

UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR
DEPARTAMENTO DE TEORÍA DE LA SEÑAL Y COMUNICACIONES



PROYECTO FIN DE CARRERA

ESTUDIO ACÚSTICO DE LA SALA 25 DE LOS CINES KINÉPOLIS

INGENIERÍA TÉCNICA DE TELECOMUNICACIONES: SONIDO E IMAGEN

Autor: **Juan Carlos Prieto Hernández**
Tutor: **Luis Antonio Azpicueta Ruiz**

Madrid, septiembre de 2011

DATOS GENERALES DEL PROYECTO

TÍTULO

Estudio acústico de la sala 25 de los cines Kinépolis

AUTOR

Juan Carlos Prieto Hernández

TUTOR

Luis Antonio Azpicueta Ruiz

DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

El presente proyecto aportará tanto una descripción teórica de las bases acústicas de las salas cinematográficas como una simulación mediante software de simulación acústica de la sala 25 de los cines Kinépolis.

TRIBUNAL

Presidente: Sergio Sanz

Secretario: Eduardo Martinez

Vocal: Isaac Seoane

CALIFICACIÓN

Realizado el acto de presentación y defensa del Proyecto Fin de Carrera a fecha de 29 de septiembre de 2011, en Leganés, en la Escuela Politécnica Superior de la Universidad Carlos III de Madrid, se acuerda otorgar la calificación de:

ÍNDICE

1. PRÓLOGO.....	11
1.1 Objetivos:.....	11
1.2 Motivación:.....	11
1.3 Agradecimientos:.....	12
2. INTRODUCCIÓN.....	15
2.1 Historia de la acústica y del sonido:.....	15
2.2 Historia de la acústica y del sonido en el cine:.....	18
3. TEORÍAS ACÚSTICAS.....	23
3.1 Introducción:.....	23
3.2 Teoría Estadística:.....	23
3.2.1 Suposiciones:.....	23
3.2.2 Conceptos importantes:.....	24
3.2.3 Aproximaciones:.....	28
3.3 Teoría Geométrica:.....	33
3.3.1 Suposiciones:.....	33
3.3.2 Leyes geométricas de propagación:.....	34
3.3.3 Conceptos importantes:.....	38
3.4 Teoría Ondulatoria:.....	42
3.4.1 Suposiciones:.....	43
3.4.2 Modos propios:.....	44
3.4.3 Modos degenerados:.....	46

3.5 Teoría Psicoacústica:.....	46
3.5.1 Principios:.....	46
3.5.2 El oído como parte fundamental:.....	47
3.5.3 Audición espacial con fuentes múltiples en espacios cerrados:.....	51
3.5.4 Parámetros objetivos:.....	59
 4. CARACTERÍSTICAS ACÚSTICAS DE LAS SALAS.....	65
4.1 Parámetros acústicos:.....	65
4.1.1 Nivel de presión sonora:.....	65
4.1.2 Ruido de fondo:.....	66
4.1.3 Tiempo de reverberación:.....	67
4.1.4 EDT:.....	70
4.1.5 Sonoridad:.....	71
4.1.6 Claridad:.....	73
4.1.7 Definición:.....	74
4.1.8 ALCONS:.....	75
4.1.9 STI:.....	76
4.1.10 RASTI:.....	78
4.1.11 ITD GAP:.....	78
4.1.12 Factores de Beraneck:.....	78
4.2 Defectos acústicos:.....	80
4.2.1 Ecos:.....	80
4.3 Valores recomendados:.....	82
4.3.1 Salas cinematográficas:.....	82
4.3.2 Salas de conferencias:.....	84
4.3.3 Salas de conciertos:.....	85
 5. REFUERZO SONORO.....	89

5.1 Acústica básica de salas:.....	89
5.1.1 Efecto procedencia:.....	89
5.1.2 Realimentación acústica:.....	90
5.2 Métodos de recubrimiento:.....	91
5.2.1 Sistema Surround:.....	92
5.3 Equipamiento:.....	97
5.3.1 Equipamiento necesario por la funcionalidad de la sala:.....	97
5.4 Sistema de conexionado:.....	99
5.4.1 Sesiones de cine:.....	99
5.4.2 Coloquios:.....	99
5.4.3 Conciertos:.....	100
 6. ACONDICIONAMIENTO ACÚSTICO.....	103
6.1 Geometría de la sala:.....	104
6.2 Materiales de acondicionamiento:.....	105
6.2.1 Materiales absorbentes:.....	106
6.2.2 Difusores:.....	109
 7. PROCESO DE CREACIÓN Y SIMULACIÓN DE LA SALA CON EASE.....	111
7.1 La sala:.....	111
7.2 Diseño:.....	114
7.3 Materiales:.....	119
7.3.1 Pantalla:.....	122
7.3.2 Suelo:.....	123
7.3.3 Tela paredes:.....	124
7.3.4 Puertas:.....	125

7.3.5	Cortinas:	126
7.3.6	Butacas:	127
7.3.7	Quitamiedos:	128
7.3.8	Vidrio:	129
7.3.9	Techo:	130
7.4	Altavoces:	131
7.4.1	Configuración altavoces:	131
7.4.2	Especificaciones altavoces:	132
7.4.3	Creación de los altavoces con EASE:	139
7.5	Contrucción de la sala:	142
7.5.1	Edición de la sala con EASE:	142
7.5.2	Edición de los materiales y altavoces con EASE:	144
7.6	Estudio de la simulación:	146
7.6.1	Tiempo de reverberación:	146
7.6.2	Ruido de fondo:	150
7.6.3	Inteligibilidad:	151
7.6.4	Claridad:	155
7.6.5	Nivel de presión sonora:	158
7.6.6	Tiempos de llegada:	161
7.6.7	Tiempo de retardo:	165
8.	PRESUPUESTO	169
9.	CONCLUSIONES	171
10.	TRABAJO FUTURO	173
11.	BIBLIOGRAFÍA	175

1. PRÓLOGO

1.1. OBJETIVOS

Los objetivos de este proyecto son dos, el primero desde un punto de vista del análisis acústico y el segundo enteramente personal.

El objetivo principal es dar a conocer, de manera sencilla y acorde a la realidad, cómo funciona y cómo se comporta acústicamente una sala de cine, en concreto la sala 25 de los cines Kinépolis. Para ello, se explicarán previamente los conceptos básicos de acústica, relacionándolos con el estudio de la sala específica, de modo que podamos afrontar este objetivo con plenas garantías de éxito y compensando que en nuestro proyecto no se toman medidas en la sala debido a que Kinépolis es una empresa privada, que compite por ofrecer las mejores salas de cine, no permitiendo este tipo de actuación en su complejo.

Por otra parte, pretendo afianzar los conceptos adquiridos a lo largo de estos años de carrera afrontando un caso práctico.

1.2. MOTIVACIÓN

En primer lugar, la elección de un proyecto que tenga que ver con la rama de la acústica viene originada por mis gustos. Cuando elegí estudiar Ingeniería Técnica de Telecomunicaciones, se debió al apellido que portaba esta carrera: Sonido e Imagen. Más concretamente por el sonido.

A lo largo de la carrera se reserva un espacio muy reducido a esta parte específica, debido a la diversidad de campos que alcanzan las telecomunicaciones. Por tanto, a la hora de terminar mis estudios quería hacerlo adentrándome en el mundo de la acústica arquitectónica de una forma real, analizando un caso práctico.

El porqué de una sala de cine, lo podría explicar de la siguiente forma; soy bastante aficionado al mundo cinematográfico, por tanto, me parecía interesante concretar el estudio acústico de una sala de cine, puesto que la sala es el punto de comunión entre una buena película y una agradable experiencia perceptiva de la misma. Un buen guión, una buena producción, unos buenos actores y una buena dirección se quedan en nada si el lugar donde se proyecta la película está mal acondicionado o mal reforzado acústicamente.

Además en la universidad ya se habían realizado proyectos acústicos de otro tipo de salas, tales como teatros, aulas o salas polivalentes, pero no había nada acerca de una sala de este tipo.

1.3. AGRADECIMIENTOS

Agradecer con palabras me parece demasiado fácil, pero aún así lo haré de manera breve.

En primer lugar, debo agradecer a mi familia todo lo que hace por mí día a día, lo que permite que me encuentre en disposición de estar haciendo un proyecto fin de carrera.

De manera especial, agradecer a Marta la fuente de contacto que me proporcionó en Kinépolis para poder afrontar este proyecto, sin la que habría sido imposible meterme en esta aventura que tanto me apetecía. Además agradecerle toda la paciencia que ha tenido conmigo y los sacrificios que le han supuesto esos largos ‘días de proyecto’.

Por último, dar las gracias a Luis, mi tutor, ya que sin su mano esto no se habría acabado.

2. INTRODUCCIÓN

Hemos decidido incluir una base teórica extensa puesto que no hay ningún Proyecto Fin de Carrera orientado a las salas de cine. De esta forma se cubre también un objetivo pedagógico de cara a los alumnos seguidores del cine.

Para empezar, hemos resumido de forma breve, en primer lugar, la historia de la acústica y del sonido de forma genérica y, en segundo lugar, concretamente en el mundo del cine.

2.1. HISTORIA DE LA ACÚSTICA Y DEL SONIDO

La experiencia acústica ha modelado las relaciones humanas desde los comienzos de la humanidad. El comportamiento social de las personas ha supuesto que a lo largo del tiempo se hayan estudiado las influencias mutuas entre el arte del sonido y la arquitectura, para disfrutar de él. La historia del sonido está íntimamente relacionada con la historia de las ondas.

Los primeros estudios conocidos del sonido se remontan a Pitágoras (528 a.C – 507 a.C.) debido a su interés por la naturaleza de los intervalos musicales. Además, postuló que un cuerpo que se desplaza a una cierta velocidad produce sonido.

Más tarde Platón (427 a.C. – 347 a.C.) definiría el sonido como una oscilación periódica que agita las moléculas hasta que tocan nuestro tímpano y alcanzan el alma.

La primera reflexión que analiza el sonido como onda se encuentra en una declaración de Aristóteles (384 a.C – 322 a.C), quién indicó que el movimiento del aire es generado por una fuente, moviéndose hacia delante de modo que las ondas sonoras inalteradas se propaguen hasta donde la perturbación del sonido sea sostenible. En Grecia se aplicaron estos principios a la hora de construir teatros, odeónes... Emplearon mecanismos para reforzar y amplificar el sonido. La pendiente de las gradas, la pared trasera, la tarima circular reflectante en el escenario y gradas, la utilización de máscaras para incrementar la expresión facial y a la vez amplificar las voces...

Los romanos mejoraron estas construcciones añadiéndoles elementos como el 'Velorium' (toldo poco absorbente que favorecía la reverberación de sonidos aumentando el nivel total) o pantallas acústicas para proteger la zona de audiencia de sonidos contaminantes externos. Pero no fue hasta alrededor del año 20 a.C. cuando se fijó el comienzo de la acústica arquitectónica como estudio específico. Vitrubio escribió un tratado sobre las propiedades acústicas de los teatros, incluyendo temas como la interferencia, los ecos y la

reverberación. Además propuso en su obra el empleo de vasos de resonancia situados estratégicamente entre la audiencia para una mayor inteligibilidad. Aún así las construcciones de esta época no dejaban de ser aproximaciones burdas a la optimización debido al escaso desarrollo en la teoría de la acústica.

Leonardo Da Vinci (1452-1519) observó, haciendo palpable su fascinación por el sonido: 'Si detiene su barco y coloca la punta de un tubo de gran longitud en el agua y el otro extremo lo acerca a su oído, podrá escuchar barcos que se encuentran a gran distancia'. Además realizó numerosos bocetos que dejaban entrever su preocupación por adaptar la forma de los recintos a las necesidades acústicas.

Galileo (1564-1642) contribuyó al entendimiento del sonido, continuando con el trabajo de Pitágoras, sentando el comienzo de la acústica fisiológica y psicológica (se puede leer en un escrito: 'las ondas son producidas por las vibraciones de un cuerpo sonoro, que se difunden por el aire, llevando al tímpano del oído un estímulo que la mente interpreta como sonido'). También concluyó que la frecuencia de las ondas determina el tono (lo hizo raspando un cincel en un plato de latón produciendo un chillido, relacionando el espacio de las ranuras inducido por el cincel al tono del chillido.)

En 1640 Marin Marsenne fue el primero en determinar la velocidad del sonido midiendo el retorno de un eco. Su determinación tuvo un error inferior al 10%.

En 1660 Robert Boyle realizó el clásico experimento de radiación sónica hecha aprovechando el tictac dentro de un reloj parcialmente al vacío. Evidenció que el aire es necesario para la producción o para la transmisión del sonido.

Sin embargo, la teoría matemática de la propagación de ondas no empezó hasta la publicación de 'Principia' en 1686 por Isaac Newton, postulando la interpretación de sonidos como pulsos de presión transmitidos a través de partículas fluidas vecinas. La invención del cálculo de Newton proporcionó una nueva herramienta para estudiar el sonido a científicos y matemáticos (obtuvo la fórmula para la velocidad de onda en sólidos).

En el siglo XVIII se alcanzaron desarrollos teóricos significativos gracias a las contribuciones de Lagrange, Bernoulli y Euler entre otros.

'Miscellanea Taurinensia' es la obra que contiene un documento sobre la teoría de propagación del sonido de Lagrange. Indica errores cometidos por Newton, obtiene la ecuación diferencial del movimiento y halla la solución para el movimiento en línea recta. Además contiene la solución completa de una cuerda que vibra transversalmente llegando a la conclusión que la forma de la curva para un tiempo 't' cualquiera viene dada por la siguiente ecuación:

$$y = a \sin(mx) \cdot \sin(nt)$$

Euler enunció una cantidad enorme de desarrollos matemáticos que más tarde aplicaría sobre la música. En 1739 escribió 'Tentamen Novae Theoriae musicae' incorporando así el uso de las matemáticas a la teoría musical. Pero no suscitó

mucho entusiasmo por parte del público, llegó a ser descrita como demasiado matemática para los músicos y demasiado musical para los matemáticos.

El tratamiento matemático completo del sonido no fue posible hasta el siglo XIX cuando Ohm aplicó el análisis armónico desarrollado por Fourier a la teoría del sonido.

En este siglo, los gigantes de la acústica eran Helmholtz en Alemania y Rayleigh en Inglaterra. El primero mientras estudiaba el oído, formuló la teoría de la resonancia, según la cual ciertos órganos del oído interno actúan como resonadores. Con la publicación 'Sobre la sensación del tono como base de la fisiología de la teoría de la música' demostró que la estética de ésta estaba en función de la capacidad mecánica del oído para percibir el movimiento de las ondas. Inventó el resonador de Helmholtz, que es un tipo de absorbente acústico creado artificialmente para eliminar un estrecho margen de frecuencias. También combinaba sonidos preexistentes permitiendo la generación de nuevos, siendo el precursor de los actuales *samplers* (instrumento musical electrónico similar en algunos aspectos a un sintetizador pero que, en lugar de generar sonidos, utiliza grabaciones de sonidos que son cargadas o grabadas en él por el usuario para ser reproducidas mediante un teclado, un secuenciador u otro dispositivo para interpretar o componer música).

El segundo fue el primero en describir una onda de sonido como una ecuación matemática y el primero en describir cómo pequeñas partículas presentes en la atmósfera dispersan determinadas longitudes de onda en su obra 'La teoría del sonido'.

A finales de este siglo, debido al creciente interés por los problemas de la acústica aplicada apareció Sabine, a quién se le denomina fundador de la acústica arquitectónica moderna. Fue capaz de determinar la vinculación entre la calidad acústica, el tamaño de una sala y la suma de las superficies de absorción, definiéndolo formalmente como el tiempo de reverberación que sigue siendo en la actualidad la característica más importante para medir la calidad acústica de una sala. Definió este tiempo de reverberación como el número de segundos necesarios para que la intensidad del sonido caiga desde un nivel de 60 dB por encima del umbral de audición al umbral inaudible, encontrando la fórmula matemática correspondiente.

Por otra parte, durante este mismo siglo también se produjeron inventos capaces de registrar el sonido que supusieron un adelanto importante en el conocimiento del sonido.

La primera invención conocida de un dispositivo capaz de grabar sonido fue el fonógrafo, por el francés Leon Scott. Este podía transcribir el sonido a un medio visible pero no tenía modo de ser reproducido después. El aparato consistía en un cuerno que recogía las ondas sonoras hacia una membrana a la que estaba atada una cerda, cuando llegaba el sonido ésta vibraba marcando así el propio sonido sobre un medio visible. Era usado para determinar la frecuencia del tono musical y estudiar el sonido y el habla.

En 1877 Edison creó un aparato capaz de transformar la energía acústica en mecánica, el fonógrafo. Los sonidos se grababan en un cilindro de cera; para reproducirlos, una aguja unida a un audífono de un tamaño considerable debía recorrer los surcos para recoger las ínfimas vibraciones allí escritas.

En 1888 Berliner terminó su gramófono, sustituyendo el cilindro de Edison por un disco de goma endurecida (vulcanite). El principio de funcionamiento era el mismo, pero el gramófono acabó imponiéndose sobre el fonógrafo dado que a partir de un único molde podían realizarse miles de copias. Además de ser más sencillo, barato y tener mayor duración.

En 1911 con el invento del tubo Audión de DeForest fue posible amplificar estos campos magnéticos haciendo realidad el magnetofón de alambre, el primer sistema magnético de audio.

En 1925 aparece el tocadiscos con la incursión de los amplificadores de válvulas. De forma que se empiezan a reproducir los discos de forma eléctrica.

En 1958 se empiezan a publicar los primeros discos en estéreo.

Paralelamente a las aportaciones de Edison, se estaba gestando el sistema de grabación magnético gracias a las investigaciones de Smith. Su proyecto quedó estancado debido a que la tecnología electrónica no estaba lo suficientemente desarrollada como para amplificar.

El casete compacto es introducido por Philips en Europa en 1963 y un año más tarde en Estados Unidos con la idea de reducir tanto el tamaño de los magnetófonos como de las cintas.

La Era Digital supuso un cambio radical para el registro del sonido. En 1978 sale a la venta el primer sistema óptico, el Laserdisc. Cinco años después aparece el Cd basado en esta tecnología. Y en 1980 aparece el DAT.

En la actualidad siguen realizándose adelantos que permiten una evolución cualitativa en la grabación y reproducción de sonido de alta fidelidad.

2.2. HISTORIA DE LA ACÚSTICA Y DEL SONIDO EN EL CINE

El sonido siempre ha ido evolucionando por detrás de la imagen en las proyecciones cinematográficas. De ahí que al principio el cine fuese mudo.

La reproducción del sonido también se antojó más complicada que el acondicionamiento acústico de la sala. Como hemos comentado en el punto anterior, ya los romanos utilizaron el 'Velorium' o pantallas acústicas en sus teatros para mejorar la impresión sonora en los espectadores. Por tanto antes de empezar a introducir aparatos reproductores de sonido en las salas, se dominaba en cierto grado la técnica de optimización acústica del recinto.

En las salas de cine más primitivas se comenzó hablando o produciendo ruidos detrás de la pantalla, todo esto complementado por el acompañamiento musical en vivo durante las proyecciones y, en algunos casos, la utilización de un locutor que añadía comentarios a los rótulos.

En el año 1893, Charles Pathé, uno de los pioneros del cine, combinó fonógrafo y cinematógrafo, llegando a fabricar unas 1900 películas cantadas. Y también en la misma época, Léon Gaumont desarrolló un sistema de sonorización de films parecido, que presentó en la Exposición Universal de París de 1902. En la década siguiente se produjeron algunos inventos importantes como primeros experimentos, de la mano de Eugène Lauste y Messter Baron y Ruhmer, pero que no llegaron a alcanzar un éxito práctico debido a la mala calidad del sonido resultante y problemas con la sincronización.

En 1918, es patentado el sistema sonoro llamado TriErgon, que permitía la grabación directa en el celuloide.

En 1923, Lee de Forest presenta su invento definitivo y establece las bases del sistema que finalmente se impuso. El Phonofilm resolvía los problemas de sincronización y amplificación del sonido, porque lo grababa encima de la misma película. A pesar del éxito logrado, la falta de financiación postergó la implantación del invento hasta el año 1925.

En 1925, la compañía Western Electric decide apostar por Lee de Forest y, en el año 1926, se inició la producción bajo la tutela de la Warner Brothers que, con esta apuesta, pretendía superar una mala situación económica. Y así ese año presentaban cinco cintas en que la imagen convivía con el sonido gracias al sistema Vitaphone de sincronización disco-imagen. Se grababan las bandas sonoras en diferentes discos que se ponían sincronizadamente con la película.

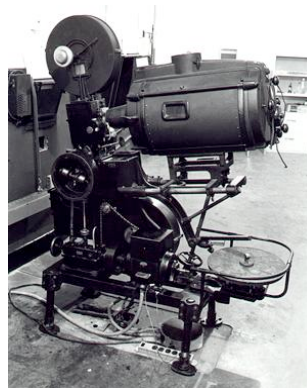


Fig. 2.1.: Vitaphone

En 1927 se utiliza el MovieTone, que es una versión mejorada del Phonofilm, siendo la misma base, un tocadiscos coordinado con el proyector de cine. Pero a menudo se producían errores de sincronía, por lo que no se expandió de forma definitiva y no llegó a Europa.

En 1930 se produce una innovación con la llegada del Westrex, el primer sistema de sonido óptico. Aprovechando el invento de la célula fotoeléctrica por Edison (1929) se incorpora una banda de sonido consistente en la impresión que dejaba un obturador al abrirse y cerrarse cuando recibía sonido. Esa banda es leída por la célula fotoeléctrica que se incorpora en los proyectores.

En 1954 la televisión le come terreno al cine quitándole numeroso público. Para contrarrestar este hecho las salas de cine intentan ofrecer imágenes más grandes y mejor sonido inventándose los grandes formatos: Scope y Todd-AO. Con ellos entra en escena la utilización de las bandas magnéticas de sonido, admitiendo ésta un número mayor de pistas. Con el Scope se consigue un 3.1 (izquierdo, central, derecho y subwoofer) y con el Todd-AO 6 canales (izquierdo frontal y trasero, central frontal y trasero y derecho frontal y trasero). Mientras que con Scope (35 mm.) no hubo que adaptar los proyectores, con el Todd-AO sí fue necesario ya que era un fotograma mucho mayor (65-70 mm.). Además de esto se requería que las salas tuvieran un lector magnético en lugar del tradicional óptico, por lo que la reconversión es complicada y no todos los cines quisieron hacerla. Finalmente este sistema murió ya que el sonido terminaba muy deteriorado a los pocos meses de ser proyectadas.

En los 70 los sistemas domésticos de sonido eran mucho mejores que los que ofrecía el cine, que se quedaba obsoleto. La solución fue el Dolby Stereo. Este sistema incorpora una segunda pista óptica (no fue necesaria la adaptación de los proyectores mono, que sólo leían una de las bandas). La primera película en Dolby Stereo fue Star Wars.

En 1981 se crea el Dolby Surround. Extrayendo un canal envolvente. Aprovechaba los dos canales del estéreo para sacar un canal central y uno de subwoofer. La fórmula es muy sencilla: $C=0.707x(L+R)$ y $S=0.707x(L+R)$ Es decir; cogía aproximadamente un 0.7% de L y R y lo convertía en el nuevo canal.

En 1988 se pasa al soporte óptico digital con Dolby Digital. Se trató que fuera compatible con el sistema analógico, por lo que las dos bandas ópticas continuaban en la parte derecha de la película mientras que se incorporó una serie de números binarios en la parte izquierda, que era leída sólo por los proyectores digitales. Si estaba bien comprimido se conseguían muchos canales. En sus comienzos fue un 5.1 (izquierdo frontal y trasero, central, derecho frontal y trasero y subwoofer), cada uno independiente. Actualmente ofrece sonido 7.1.

En 1991 se inventa el DTS (Digital Theaters Sound), creado para competir con el Dolby Digital. Sigue siendo compatible con el sistema analógico. Es una versión digital del Movietone: en la película sólo aparecen unas líneas de sincronía que son leídas por el proyector que está conectado a un lector de discos parecidos a los CDs domésticos. Puede contener una gran información sonora al estar separada del rollo de película. Ofrece 5.1 al igual que el sistema Dolby Digital. Actualmente también ofrece 7.1. Los puntos de sincronía se sitúan en la parte izquierda de la película donde están los agujeros que utiliza el proyector para hacerla avanzar. Todo esto le permite ser el único sistema digital compatible con películas de 70 mm.

En 1993 cuando Sony compra Columbia Pictures crea el sistema SDDS (Sound Digital Dynamic System). Se basa en la idea del DTS pero no son compatibles. Utilizan el lado contrario que el DTS para situar sus puntos de sincronía, también en la parte de los agujeros. Ofrece una gran calidad de sonido con el 7.1 (Izquierdo, Izquierdo Central, Central, Derecho Central, Derecho, Subwoofer, Izquierdo Trasero y Derecho Trasero). Este sistema no está muy extendido en Europa, aunque las películas de Columbia Pictures se suelen grabar con él.

De forma paralela se desarrolla THX, creado por George Lucas. THX es un certificado que asegura unos requisitos mínimos de calidad en salas de proyección con sistemas multicanal (no se debe confundir con un sistema de sonido).

3. TEORÍAS ACÚSTICAS

3.1. INTRODUCCIÓN

Las teorías acústicas son formas diferentes de enfrentarse a un mismo conflicto. Estudian cómo actúa un recinto determinado en el que se emite un sonido por medio de una fuente en función de la respuesta en frecuencia de la sala. Se producen cambios en la misma debido a las diferencias de dimensiones, volumen, materiales, etc. del recinto.

Estos cambios en el sonido se pueden analizar con diferentes teorías, entre otras: estadística, geométrica, ondulatoria y psicoacústica.

Las tres primeras afrontan el análisis en base al estudio de parámetros objetivos existentes en la sala y por tanto medibles. Se puede observar además que la primera de ellas es la más simplista y que se van teniendo en cuenta mayor número de parámetros según vamos avanzando de una teoría a la siguiente. La última encara el problema desde el punto de vista subjetivo de la percepción humana.

3.2. TEORÍA ESTADÍSTICA

3.2.1. SUPOSICIONES

Esta teoría se basa en la suposición de campo sonoro difuso y se centra en estudiar la reverberación de la sala (explicado en el siguiente punto).

Es algo simplista aunque eficaz. Las conclusiones a las que se llega con este estudio resultan aproximadas debido a las suposiciones hechas, pero facilitan la comprensión y caracterización del campo sonoro en el interior de un recinto.

Para su uso se debe considerar:

- La fuente radia del mismo modo en todas las direcciones posibles.
- Las ondas reflejadas se propagan en todas las direcciones con igual probabilidad.

- La densidad de la energía sonora en un instante de tiempo determinado es la misma en cualquier posición de la sala.
- La energía sonora en un punto se obtiene como señales incoherentes, mediante la suma de las medias de todas las reflexiones que llegan a dicho punto, sin tener en cuenta las fases.

Esto difiere de la realidad en los siguientes aspectos:

- Las fuentes son directivas en algún modo.
- Las reflexiones se distribuyen de distintos modos según las materiales, dimensiones y la forma de la sala.
- Las señales tienen un cierto grado de coherencia y por tanto se deben tener en cuenta las fases.

3.2.2. CONCEPTOS IMPORTANTES

3.2.2.1. Reverberación

La reverberación es la permanencia del sonido tras haber cesado la fuente que lo produjo. Se mide por el tiempo de reverberación, que es el tiempo necesario para que la intensidad de un sonido disminuya una millonésima parte de su valor inicial, es decir, 60 dB.

La variación de la energía sonora que se produce con la radiación de una fuente es la siguiente:

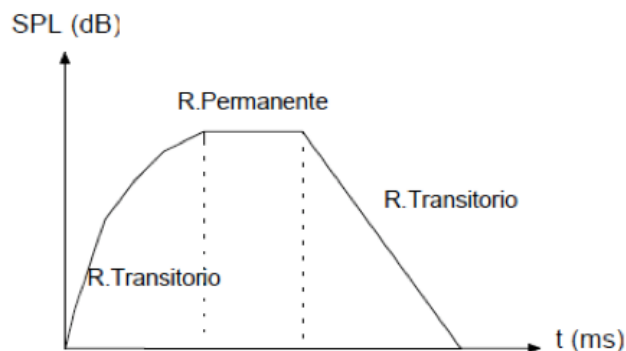


Fig. 3.1.: Balance sonoro en el interior de un recinto

Tras la inspección de la figura, se observa cómo durante el primer transitorio la energía sonora aumenta progresivamente debido al aporte directo de la fuente y las reflexiones que empiezan a originarse. Se alcanza un régimen permanente cuando se iguala la absorción de la sala con la energía procedente de la fuente, permaneciendo en él hasta que se apaga la fuente. En el segundo transitorio, la energía sonora decae primero al desaparecer el sonido directo y después, al disminuir paulatinamente el número de reflexiones.

La duración de este último transitorio es lo que determina el tiempo de reverberación (TR), que es mayor cuanto más reverberante sea la sala, o lo que es lo mismo, menos absorbente sea la misma.

Conocer el tiempo de reverberación se antoja interesante, debido a que aún sin ser un parámetro suficiente como para considerar la sala adecuada o no, es una magnitud orientativa para realizar ajustes sobre todo en fases de construcción. Además en nuestra simulación de la sala de cine será imprescindible demostrar que estos valores se ajustan a las tolerancias THX y Dolby.

3.2.2.2. Campo libre y campo sonoro difuso

En los procesos de emisión, propagación y recepción del sonido, el tipo de campo acústico en el que ocurren tiene una gran influencia.

Si el sonido radiado por la fuente omnidireccional no es obstaculizado por ningún objeto, la intensidad acústica varía de acuerdo con el inverso del cuadrado de la distancia. En este caso, se habla de propagación en campo libre, como ocurre en un espacio abierto, libre de superficies reflectantes.

En los laboratorios de acústica, estas condiciones de campo libre se consiguen en el interior de una cámara anecoica, en la que sus paredes están recubiertas de un tratamiento altamente absorbente a la energía acústica.

Por el contrario si la onda acústica encuentra obstáculos en su propagación, aparecen fenómenos de difracción y reflexión.

Los fenómenos de difracción se presentan cuando se interpone en la trayectoria de la onda acústica un obstáculo de dimensiones reducidas en relación con su longitud de onda o cuando el mismo presenta discontinuidades. En caso contrario se reproduce el fenómeno de reflexión.

Como hemos comentado al principio, para poder realizar el análisis estadístico debemos idealizar la sala de forma que se comporte como campo sonoro difuso. Esto explica que:

- Las reflexiones rebotan en todas las direcciones con igual probabilidad.
- La energía en un punto de la sala se puede obtener sumando aritméticamente los valores medios de la energía de las ondas que pasan por ese punto. Para ello las fases deben ser independientes.
- La densidad de energía sonora en un instante de tiempo es la misma en cualquier punto del recinto.

3.2.2.3. Absorción

Cuando un foco sonoro emite energía acústica, las ondas sonoras se propagan a partir de él en forma de onda esférica si no encuentran ningún obstáculo en su camino. Al chocar contra algún obstáculo se reflejan cambiando su dirección. Si la superficie reflectante fuese completamente impermeable al aire y perfectamente rígida no habría pérdida de energía en cada reflexión. Sin embargo, en la realidad no existe un reflector perfecto, ya que éste entrará en vibración por efecto de la onda incidente, o permitirá la propagación de las ondas sonoras en el interior del material, si éste tiene estructura porosa. Como consecuencia de cualquiera de estos dos procesos, las ondas reflejadas tendrán menos energía acústica que las incidentes, diciéndose que parte de la energía acústica ha sido absorbida por la superficie.

El sonido que genera un foco sonoro en el interior de un recinto incide sobre las superficies límite de éste, reflejándose en parte, y estas reflexiones tienden a aumentar el nivel de presión sonora en el interior del recinto. De la siguiente forma:

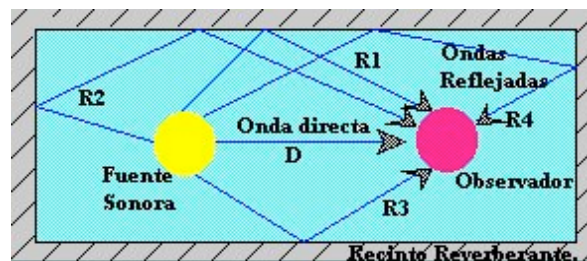


Fig. 3.2.: Reflexiones de los rayos en un recinto acotado

Los materiales absorbentes sonoros son aquellos que reducen el nivel de energía sonora de las reflexiones que existen en el interior de un local.

Podemos encontrar el recinto de dos formas:

- Recubierto del mismo material

Atendiendo a este requisito la absorción (A) será:

$$A = \alpha S \text{ (Ec. 3.1.)}$$

Siendo:

A= área de absorción.

α = coeficiente de absorción.

S= superficie.

Por otra parte, hay que tener en cuenta que realmente el ángulo de incidencia del sonido afecta directamente en la absorción y, en este caso, estamos obviando dicho ángulo, haciendo una simplificación.

- Recubierto de distintos materiales

Este caso será el más común (es el caso de nuestra sala) y la absorción vendrá dada por el sumatorio de esas absorciones:

$$A = \sum \alpha_n S_n \text{ (Ec. 3.2.)}$$

El coeficiente medio de absorción será:

$$\alpha_m = \frac{\sum \alpha_n S_n}{\sum S_n} \text{ (Ec. 3.3.)}$$

Se debe tener en cuenta que la absorción varía con la frecuencia.

3.2.3. APROXIMACIONES

3.2.3.1. Tiempo de reverberación de Sabine

El físico Sabine desarrolló una fórmula para calcular el tiempo de reverberación (TR) de un recinto en el que el material absorbente está distribuido de forma uniforme. Consiste en relacionar el volumen de la sala (V), la superficie del recinto (S) y la absorción total (α) con el tiempo que tarda el sonido en disminuir 60 dB en intensidad, a partir de que se apaga la fuente sonora.

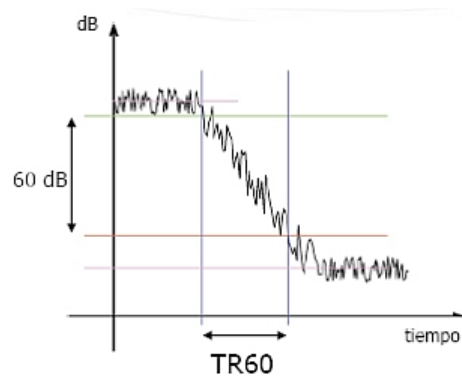


Fig. 3.3.: Caída de la energía sonora tras apagar la fuente

La expresión que obtuvo fue:

$$T_{60} = \frac{0.161V}{\sum S_n \alpha_n} \quad (\text{Ec. 3.4.})$$

El divisor es el sumatorio de cada una de las superficies de la sala con distinto coeficiente de absorción multiplicadas por éste.

De esto podemos sacar dos conclusiones:

- Si el coeficiente de absorción aumenta, la sala se hace menos reverberante, disminuyendo así el tiempo de reverberación.
- Si el volumen del recinto aumenta, el tiempo de reverberación también lo hace (aunque esto es menos claro debido a que la superficie también aumenta).

La fórmula de Sabine no es la única, ni es absolutamente fiable. Es una aproximación muy útil pero no totalmente real.

Hay otros factores a tener en cuenta:

- Dentro de la sala hay otros objetos que también absorben sonido y que por tanto influyen en el campo sonoro creado.
 - Absorción producida por los muebles y objetos colocados en la sala.
 - Variación de la absorción producida por el público presente en la sala. El cuerpo humano también absorbe las ondas sonoras influyendo en la absorción total.
- Dentro del recinto habrá un volumen de aire igual al de la sala. Este aire es atravesado por las reflexiones perdiendo así energía a su paso.

Esta fórmula se suele utilizar para salas 'vivas' con pequeño grado de absorción.

3.2.3.2. Correcciones de Eyring y de Millington-Sette

Como consecuencia de las limitaciones de la fórmula de Sabine aparecieron aportaciones póstumas de otros autores.

Los principales errores se encontraron en:

- Si el coeficiente medio de absorción es igual a la unidad, el tiempo de reverberación es distinto de cero, lo que físicamente no tiene sentido. Dependiendo ese tiempo de reverberación del volumen de la sala.
- Cálculos prácticos de ese coeficiente a partir de ciertos tiempos de reverberación son mayores a la unidad, lo que es imposible.

Con ello aparecieron nuevas formas de cálculo del tiempo de reverberación, entre ellas la de Eyring y la de Millington-Sette.

- Cosas en común de las tres fórmulas:

Suponen que el tiempo de reverberación:

- No varía dentro de la sala.
- No depende de la posición de la fuente.
- No depende de la forma ni de la geometría de la sala.
- No depende de la situación de los diferentes materiales de la sala.

- Discrepancias de conceptos entre las tres fórmulas:

- Sabine supone que el descenso de la energía acústica cuando cesa la fuente se produce de manera lineal, mientras que Eyring y Millington-Sette suponen que se produce a saltos.
- Además Millington-Sette supone que cada reflexión sobre una pared se reparte siempre sobre el resto de las superficies de forma secuencial, mientras que Eyring supone que se hace simultáneamente.

- Aproximación de Millington-Sette

$$T_{60} = 0.161 \frac{V}{\sum \alpha_k S_k} \quad (\text{Ec. 3.5.})$$

Donde:

$$\alpha_k = -\ln(1 - \alpha_n) \quad (\text{Ec. 3.6.})$$

La explicación de la formula anterior es el siguiente:

El valor del coeficiente de absorción de cada material tiene su origen en la intensidad de las ondas después de un número 'n' de rebotes:

Intensidad de la onda tras el primer choque:

$$I_1 = I_0(1 - \alpha_1) \quad (\text{Ec. 3.7.})$$

Intensidad de la onda tras el segundo choque:

$$I_2 = I_1(1 - \alpha_2) = I_0(1 - \alpha_1)(1 - \alpha_2) \quad (\text{Ec. 3.8.})$$

Intensidad de la onda tras n choques:

$$I_n = I_0(1 - \alpha_1) \dots (1 - \alpha_n) \quad (\text{Ec. 3.9.})$$

Suponiendo $\alpha_1 = \alpha_2 = \dots = \alpha_n$

$$I(t) = I_0(1 - \alpha)^{\left(\frac{c}{l_m}\right)^t} \rightarrow I(t) = I_0 e^{(\ln(1 - \alpha)) \left(\frac{c}{l_m}\right)^t} \quad (\text{Ec. 3.10.})$$

Deducimos por tanto que el coeficiente de absorción de cada material es igual al exponente de absorción: $\alpha_k = -\ln(1 - \alpha_n)$ (Ec. 3.11.).

Nota: α_k hace referencia al material y α_n al número de choque.

Esta aproximación es válida para campos sonoros difusos que puedan además presentar una distribución pseudo-uniforme del material absorbente (materiales con coeficientes de absorción distintos)

Esta corrección aún habiendo solventado los dos problemas enunciados anteriormente de Sabine sigue teniendo un problema:

- Si hay una ventana abierta siendo así igual a la unidad su coeficiente de absorción, automáticamente el tiempo de reverberación es nulo, sin importar en qué orden se encuentre con esa ventana el frente de ondas.

- Aproximación de Eyring

$$T_{60} = 0.161 \frac{V}{-S \ln \left(1 - \frac{\sum \alpha_k S_k}{\sum S_k} \right)} \quad (\text{Ec. 3.12.})$$

Supone que después de haber recorrido un camino libre todas las superficies son encontradas de cara a la onda.

Esta aproximación es válida para campo sonoro difuso y todo tipo de salas.

Eyring comparte un error con Sabine: puede obtener valores del coeficiente de absorción mayores a la unidad.

El programa EASE que utilizamos para el estudio de nuestra sala nos permite realizar tanto la rectificación de Sabine como la de Eyring. Nosotros utilizaremos la de Eyring evitando el error que introduce Sabine en salas con materiales bastante absorbentes.

De forma práctica, estas ecuaciones se utilizarán:

Para coeficientes de absorción parecidos:

- $\alpha > 0.2$: Eyring.
- $\alpha < 0.2$: Sabine.

Para coeficientes de absorción muy dispares entre ellos:

- Millington-Sette

3.2.3.3. Aproximación de Arau

La aproximación de Arau es la más completa porque permite simular cualquier tipo de campo sonoro.

Esta fórmula es capaz de calcular el tiempo de reverberación considerando que exista una distribución asimétrica en la absorción de una sala.

La fórmula es la siguiente:

$$T_{60} = T_x \cdot T_y \cdot T_z = \left[\frac{0.161 \cdot V}{-S \cdot \ln(1 - \bar{\alpha}_x)} \right]^{\frac{S_x}{S}} \cdot \left[\frac{0.161 \cdot V}{-S \cdot \ln(1 - \bar{\alpha}_y)} \right]^{\frac{S_y}{S}} \cdot \left[\frac{0.161 \cdot V}{-S \cdot \ln(1 - \bar{\alpha}_z)} \right]^{\frac{S_z}{S}} \quad (\text{Ec. 3.13.})$$

Cuando la distribución de los coeficientes de absorción es uniforme, la expresión de Arau coincide con la de Eyring.

Sin embargo, en nuestro proyecto no la utilizaremos debido a que EASE sólo incluye las aproximaciones de Sabine y Eyring para el cálculo del tiempo de reverberación.

3.3. TEORÍA GEOMÉTRICA

3.3.1. SUPOSICIONES

Es la teoría que se emplea con las primeras reflexiones de la curva energía-tiempo, que caracteriza a una posición determinada de la sala.

Consiste en aplicar las leyes de la Óptica Geométrica al sonido. Para ello, se modelan las ondas sonoras como rayos sonoros. Un rayo es una línea que indica la dirección y sentido de propagación del sonido, por tanto, es perpendicular a las ondas sonoras. Además, lleva un contenido energético que depende de dos factores:

- La energía total radiada.
- La directividad de la fuente.

Así, una fuente reparte su energía entre todos los rayos que emite, según su patrón de directividad. Por ejemplo, si la fuente es omnidireccional, los rayos saldrán en todas las direcciones, llevando la misma fracción de energía.

La propagación de estos rayos sonoros en el interior de la sala, cumple las leyes básicas de la Óptica Geométrica, que son:

- Propagación rectilínea. Justificada por el principio de Fermat, que establece que una onda emplea el menor tiempo posible en ir desde la fuente hasta el receptor, esto es, en línea recta.
- Las leyes de reflexión.
- Ley de Snell de la Refracción. Explica cómo una onda cambia de dirección cuando pasa de un medio a otro.

A la hora de estudiar nuestra sala, este último fenómeno se desprecia, pues consideraremos que en el interior de la habitación sólo hay un medio, cuyas características de temperatura y humedad no varían.

Las hipótesis de partida de esta teoría son:

- Tenemos un medio homogéneo e isotrópico, en el que no varían las propiedades sea cual sea la dirección en que nos movamos. Por eso

podemos despreciar el fenómeno de refracción.

- La longitud de onda del sonido que se propaga en la sala es menor que el tamaño de los obstáculos o aberturas que encuentra a su paso.
- Se considera que las superficies son lisas, por tanto, las reflexiones son especulares.
- No se contemplan las diferencias de fase entre las ondas coincidentes en un punto. De este modo, siempre se suman sus energías. Dicho de otra manera, la suma siempre es incoherente.

La utilización de esta teoría implica una serie de simplificaciones que limita su validez a determinados casos. Sin embargo, facilita notablemente el modelado acústico de salas, explicando aceptablemente el origen de las primeras reflexiones de cualquier recinto.

Esta teoría, al igual que la estadística, es especialmente interesante debido a que el programa de simulación que vamos a utilizar, EASE, hace uso de ella para realizar las aproximaciones del campo sonoro real.

3.3.2. LEYES GEOMÉTRICAS DE PROPAGACIÓN

La onda sonora pasa a considerarse rayo sonoro. La energía del rayo permanece constante a no ser que sufra pérdidas de propagación. Su intensidad decae de modo inversamente proporcional a la distancia recorrida.

$$I \propto \frac{1}{r^2} \quad (\text{Ec. 3.14.})$$

Vamos a hacer un breve repaso de los principales conceptos relacionados con las leyes geométrica de propagación:

3.3.2.1. Principio de Fermat

En óptica es un principio de tipo extremal que establece que el trayecto seguido por la luz al propagarse de un punto a otro es tal que el tiempo empleado en recorrerlo es un mínimo (no busca el camino más corto, sino el más rápido). En el plano acústico, si la velocidad de propagación del sonido es constante en toda la sala, entonces, el camino más corto y el más rápido coinciden.

Los rayos se propagan en línea recta y cada uno contiene una parte de la energía potencial total de la fuente. Como hemos dicho anteriormente, todos tendrán la misma energía en el caso de que la fuente sea omnidireccional.

Estos rayos al propagarse se encuentran con obstáculos sufriendo distintos efectos:

3.3.2.2. Difracción

Es un fenómeno característico de las ondas, éste se basa en el curvado y esparcido de las mismas cuando encuentran un obstáculo (bordeándolo) o al atravesar una rendija.

Se da con obstáculos de tamaño pequeño con respecto a la longitud de onda.

3.3.2.3. Sombra

Al encontrar un obstáculo grande, el rayo es incapaz de bordearlo, por lo tanto tras él no existirá sonido. Esta sombra estará acotada por los rayos tangenciales que, partiendo de la fuente, alcanzan la periferia del obstáculo.

3.3.2.4. Refracción

Es el cambio de dirección que experimenta una onda al pasar de un medio material a otro. Sólo se produce si la onda incide oblicuamente sobre la superficie de separación de los dos medios y si éstos tienen índices de refracción diferentes. La refracción se origina en el cambio de velocidad de propagación de la onda.

En un recinto cerrado, el medio siempre será el mismo, por lo que esto sólo se produce por grandes cambios de temperatura, originadas normalmente por columnas de aire caliente por las cuales el sonido viaja más rápido. Un hombre que esté detrás de una de ellas percibirá el sonido como si procediese de una fuente más alejada de lo que realmente está y con una intensidad menor. Por ello, los sistemas de acondicionamiento de temperatura no deben colocarse entre la fuente y el oyente.

El viento también puede producir este efecto, pero al encontrarnos en un recinto cerrado, normalmente no tendremos este problema.

3.3.2.5. Reflexión

Es el cambio de dirección de un rayo o una onda que se produce al chocar ésta con una superficie rígida coparticipando en su movimiento.

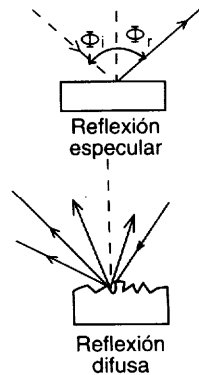


Fig. 3.4.: Reflexiones especular y difusa

- Tipos de reflexión

- Reflexión especular

Cuando la superficie reflectante es muy lisa, la reflexión tiene un ángulo igual, respecto de la normal (perpendicular en el punto de reflexión), al ángulo de la onda incidente.

- Reflexión difusa

Cuando el rayo incide en una superficie rugosa, resultará que los rayos reflejados lo harán en direcciones diferentes dependiendo del ángulo de incidencia con la superficie.

Debemos tener en cuenta dos factores a la hora de estudiar la reflexión en una superficie cualquiera (sabiendo que la longitud de onda es inversamente proporcional a la frecuencia de la onda):

- Si la longitud de onda es grande respecto a las superficies que se encuentra a su paso, serán capaces de superarlas sin problema. Se reflejan de forma especular en una

superficie rugosa como si ésta fuera lisa (la rugosidad es menor que la longitud de onda).

- Si la longitud de onda es pequeña respecto a las superficies que se encuentra, se producen sombras y se produce una reflexión difusa en las superficies rugosas.

- Otros conceptos importantes sobre la reflexión

○ Orden de las reflexiones

Es el número de veces que las ondas chocan contra una superficie, llamándose por tanto reflexiones de primer orden a las que chocan con una sola superficie, de segundo orden las producidas después de chocar con dos superficies, etc...

○ Frente de onda

Éste se delimita uniendo los puntos del espacio que se encuentran a una distancia determinada producto del tiempo transcurrido t y la velocidad de propagación c . Si los rayos no sufren reflexiones el medio por el que se propaga es el mismo en toda su trayectoria. Se obtendrá por tanto una circunferencia.

○ Distribución temporal de las reflexiones

El retardo es el tiempo relativo de llegada respecto de la señal original de otro rayo al receptor.

El ecograma es la representación en función del tiempo de la energía.

$$T_{llegada} = \frac{L_0}{c} \quad (\text{Ec. 3.15.})$$

Donde:

L_0 : es el camino recorrido.

c : velocidad de propagación.

La energía de un rayo se puede ver modificada por:

- Divergencia en la onda.
- Atenuación en la propagación.
- Intersección de los rayos sonoros con superficies absorbentes.

$$E_k = \frac{P}{c} \frac{\Pi_1^k (1 - \alpha_k)}{4\pi L_k^2} \quad (\text{Ec. 3.16.})$$

Donde:

k: es el orden del choque.

P: es la potencia del rayo.

α_k : coeficiente de absorción.

3.3.3. CONCEPTOS IMPORTANTES

3.3.3.1. Proceso de reverberación

La teoría geométrica incide en que cada reflexión debe ir caracterizada por dirección, retardo y potencia relativa.

El retardo viene dado por:

$$\Delta t_k = \frac{L_k - L_o}{c} \quad (\text{Ec. 3.17.})$$

El modo de calcular la distancia entre dos puntos es el siguiente:

$$L_o = \sqrt{[(X_s - X_o)^2 + (Y_s - Y_o)^2 + (Z_s - Z_o)^2]} \quad (\text{Ec. 3.18.})$$

Siendo X, Y y Z las coordenadas de los puntos.

Esta ecuación resulta muy útil, de manera práctica. a la hora de calcular todas las distancias de la sala de cine que estudiamos. Sobre todo las referentes a la zona de butacas, debido a que hemos tenido que sacar un volumen medio resultado de la suma de los espectadores y de las propias butacas (que se explicará en el punto 7).

- Conceptos importantes

- Ecograma:

Es una gráfica que muestra la llegada de los rayos a la posición del oyente, su instante temporal y la energía que transportan. Nos resultará fundamental a la hora de la optimización acústica, para la detección, entre otras cosas, de ecos molestos.

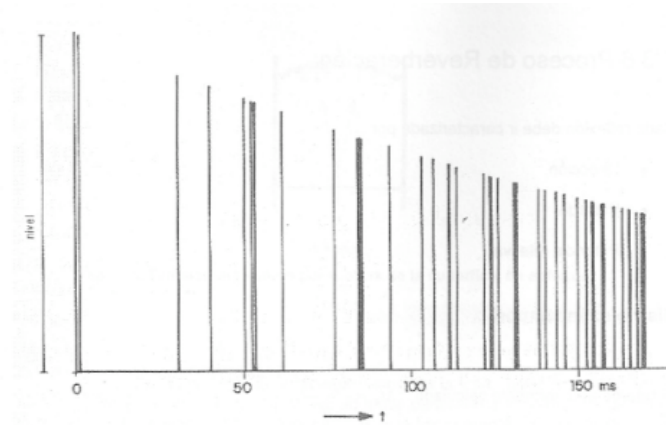


Fig. 3.5.: Ecograma

En este tipo de gráfica podemos observar dos etapas:

- Etapa 1:

Tras el sonido directo (primer segmento en el ecograma) llegan las primeras reflexiones (su tiempo termina en la llegada del primer rayo de segundo orden, que son los que sufren dos choques con las superficies del recinto).

Los rayos sonoros de primer grado están acotados por el intervalo temporal T_1 .

$$T_1 = \frac{L_2 - L_o}{c} \quad (\text{Ec. 3.19.})$$

Siendo L_2 la longitud del camino medio recorrido por los rayos de segundo orden, L_o la longitud del rayo directo y c la velocidad de propagación.

- Etapa 2:

En esta etapa, la densidad aumenta tanto que llegan a solaparse las reflexiones entre ellas.

El intervalo T_2 empieza en el primer rayo de segundo orden y termina cuando las reflexiones que llegan al oyente tienen una densidad de energía 60 dB inferior a la original, que es cuando termina el tiempo de reverberación.

El tiempo de reverberación efectivo será la suma de los transcurridos en cada etapa:

$$T_{efectivo} = T_1 + T_2 \quad (\text{Ec. 3.20.})$$

- Envoltente del ecograma:

Calcular el tiempo de reverberación eficaz aclara que hay dos procesos, el de las primeras reflexiones y el del conjunto de reflexiones posterior que se comparte con la teoría estadística.

Atendiendo a tres sucesos la envoltente del ecograma puede quedar como:

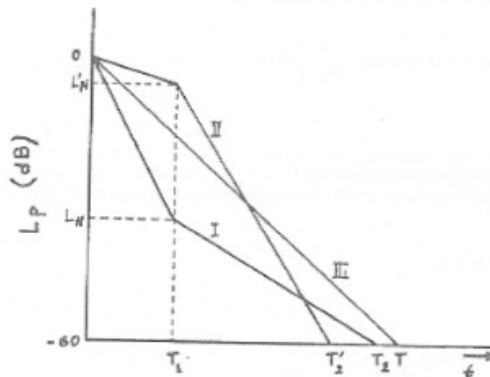


Fig. 3.6.: Tres sucesos de la envoltente del ecograma

- Curva 1: Si las primeras reflexiones (orden bajo) se encuentran con materiales absorbentes.
- Curva 2: Si las reflexiones de órdenes elevados se encuentran con materiales absorbentes.
- Curva 3: Según la teoría estadística el proceso de caída queda como la curva intermedia.

- Coeficiente de absorción:

Para calcular un coeficiente de absorción medio que se aproxime a la realidad, hay que tener en cuenta la probabilidad de que el rayo choque con cada una de las superficies:

$$\bar{\alpha} = \frac{2.2\alpha_s S_2 + \alpha_i S_i + (3.3\alpha_{pared} + \alpha_{suelo}) S_{suelo}}{2.2S_s + S_i + 2S_{techo} + 4.3S_{techo}} \quad (\text{Ec. 3.21.})$$

Este coeficiente de absorción tiene más en cuenta las condiciones reales de la sala que la teoría estadística.

Para frecuencias altas se usará la teoría geométrica ya que la longitud de onda es menor que las superficies reflectantes, pero cuando el recinto no es grande respecto a la longitud de onda, no se podrá usar ni la geométrica ni la estadística porque deberemos contar con la fase.

3.3.3.2. Campo sonoro de una sala

Es interesante conocer los dos tipos de campo sonoro distintos:

- Campo próximo:

En la zona próxima a la fuente la variaciones de presión sonora son muy apreciables alrededor de un radio dado.

La relación cuadrática entre la presión sonora media y la intensidad sonora no se cumple siempre.

El campo próximo depende de la frecuencia de la onda, una dimensión característica de la fuente y las fases de las partes que radian en la fuente.

En este margen de distancias el comportamiento sonoro es muy difícil de estudiar.

- Campo lejano:

En campo lejano el nivel de presión sonora disminuye 6 dB cada vez que se duplica la distancia a la fuente, si se da campo libre o si las paredes son lo bastante absorbentes como para no crear campo reverberante.

En campo lejano hay dos zonas, campo libre y campo reverberante, la diferencia significativa es que en campo libre las partículas se propagan en la misma dirección que la onda y la intensidad está relacionada de forma simple con la presión cuadrática media:

$$I = \frac{P^2}{\rho c} \quad (\text{Ec. 3.22.})$$

Mientras que en campo reverberante:

$$I = \frac{P^2}{4\rho c} \quad (\text{Ec. 3.23.})$$

Cuando las reflexiones comienzan a superponerse al campo inicial se entra en la parte de campo reverberante.

Si la fuente se encuentra radiando en un recinto, también aparecen fluctuaciones considerables de presión sonora dependientes de la posición en la parte reverberante del campo lejano, donde las ondas reflejadas en las superficies límites se superponen al campo incidente.

Es importante tener en cuenta esto a la hora de calcular la densidad de energía del sonido y distinguir entre, la propia, en el campo directo y en el campo reverberante. Estos dos factores se simulan para nuestra sala de cine y se explican en nuestro proyecto (apartado 7).

3.4. TEORÍA ONDULATORIA

Considerando que el efecto de la coloración no se aprecia en salas de tamaño similar a nuestro recinto, y que el programa EASE no utiliza la teoría ondulatoria, en este texto se incluye un somero resumen de esta teoría.

3.4.1. SUPOSICIONES

Esta teoría se utiliza cuando estudiamos la respuesta en frecuencia de la sala. Se sustenta en la naturaleza ondulatoria del sonido para caracterizar el campo sonoro en el interior de un recinto, mediante la resolución de la ecuación de onda.

Se considerará el volumen de la sala como un sistema vibratorio tridimensional, al que se hace vibrar mediante una excitación sonora.

Las soluciones de la ecuación de onda se denominan modos propios y ocurren a una frecuencia de resonancia, llamada de la misma manera frecuencia propia. Esto depende directamente de las dimensiones y geometría de la sala.

Nuestra sala es de forma paralelepípeda de dimensiones L_x , L_y y L_z , lo que facilitaría el cálculo de ecuación de onda, que se hace muy complicado cuando nos salimos de esta geometría. Cuando las paredes son totalmente reflectantes es aún más fácil, pero éste no es nuestro caso.

Para salas de geometría paralelepípeda y dimensiones L_x , L_y y L_z se puede utilizar la fórmula de Rayleigh para obtener las frecuencias propias:

$$f_{k,m,n} = 172.5 \sqrt{\left(\frac{k}{L_x}\right)^2 + \left(\frac{m}{L_y}\right)^2 + \left(\frac{n}{L_z}\right)^2} \quad (\text{Ec. 3.24.})$$

Donde k , m y n son los modos correspondientes (número entero); su valor determina cuantos nulos posee la presión sonora (llamados nodos) en las tres direcciones de propagación. Por tanto, la respuesta de la sala puede variar de una posición a otra, desapareciendo la contribución de un modo si la fuente o el receptor se sitúan sobre uno de estos puntos de presión nula.

En una sala, por consiguiente, hay infinitos modos localizados en frecuencia y cuya densidad aumenta con la misma.

La distribución de estos modos en frecuencia es característica de cada recinto porque depende de sus dimensiones y geometría. Para evitar coloraciones de sonido (Intensificación o atenuación de unas frecuencias respecto a otras, al combinarse el sonido directo y el reflejado, deformando el espectro sonoro) interesará que la sala sea lo más uniforme posible. Nuestra sala es lo suficientemente grande como para que el efecto de los modos propios sea despreciable y, por tanto, no se produzca coloración del sonido. La única opción para que esto se produjese sería tener superficies grandes, planas y lisas en los laterales, pero como tampoco las tenemos evitamos este defecto acústico.

Cuando hay una concentración de modos en una banda estrecha se produce coloración del sonido. Esto provoca que las componentes del sonido próximas a

esta zona, sean realizadas respecto a las otras frecuencias. No obstante, debido a que la densidad de modos aumenta con la frecuencia, existirá una frecuencia que a partir de ella no se percibe coloración.

Esta frecuencia puede estimarse:

$$f_{\max} = 1849 \sqrt{\frac{TR_{\text{medio}}}{V}} \quad (\text{Ec. 3.25.})$$

Donde:

$$TR_{\text{medio}} = \frac{TR(500) + TR(1000)}{2} \quad (\text{Ec. 3.26.})$$

TR(500): tiempo de reverberación en la banda octava centrada en 500 Hz.

TR(1000): tiempo de reverberación en la banda octava centrada en 1000 Hz.

V: volumen de la sala.

El problema de coloración suele aparecer en espacios reducidos.

La distribución de presión en una sala con forma de paralelepípedo, es:

$$p_{n_x, n_y, n_z}(x, y, z) = C \cos\left(\frac{n_x \pi}{l_x}\right) \cos\left(\frac{n_y \pi}{l_y}\right) \cos\left(\frac{n_z \pi}{l_z}\right) \quad (\text{Ec. 3.27.})$$

Donde C es una constante arbitraria resultado de las constantes de cada coordenada.

3.4.2. MODOS PROPIOS

Se denomina modo propio a cada solución que surge de resolver la ecuación de onda de una sala (onda estacionaria), aplicando las condiciones límite (paredes rígidas y sin absorción).

Dependen del número de onda k, por tanto de la frecuencia, dando lugar a un perfil de presión con una distribución de máximos y mínimos específica.

Existen tres tipos según la dirección en la que se originan:

- Modos axiales

Onda estacionaria fluctuante entre dos superficies.

Aquellos que se desplazan en una de las direcciones x, y o z. La onda será plana desplazándose en un solo eje.

- Modos tangenciales

Onda estacionaria fluctuante entre cuatro superficies.
Son bidimensionales, es decir, que dos de sus componentes son distintas de cero.

- Modos oblicuos

Onda estacionaria fluctuante entre seis superficies.
Son tridimensionales, su dirección es distinta a cualquiera de los ejes.

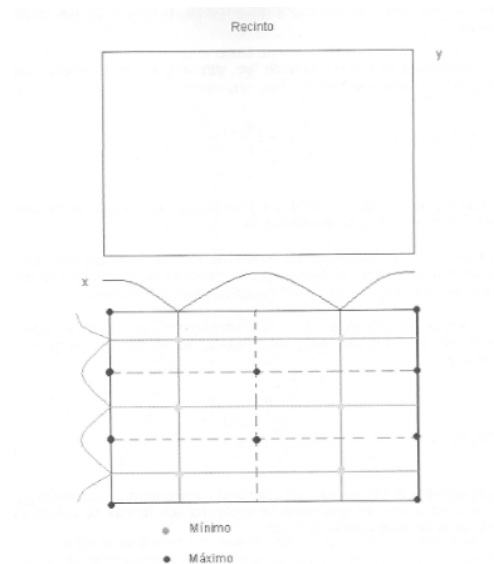


Fig. 3.7.: Mínimos y máximos de los modos propios

3.4.2.1. Frecuencias de los modos propios:

Se denominan también tonos propios o frecuencias de resonancia.

La frecuencia propia más baja que se encuentra en la sala se conoce como frecuencia de corte. Por debajo de ella no habrá modos propios, ya que es la primera que produce la aparición de la onda estacionaria.

El hecho de excitar una frecuencia u otra cambia la distribución de la presión y por ello aparece un modo u otro.

3.4.3. MODOS DEGENERADOS

La respuesta de una banda es más irregular cuanto menor es el número de frecuencias propias en dicha banda. Una de las causas de que haya pocas frecuencias en cada banda es la coincidencia de modos propios en las mismas frecuencias por la simetría de la sala. Estos modos coincidentes son los modos degenerados, y el sonido que se produce es más coloreado si cabe. Este hecho habría que valorarlo y tenerlo en cuenta en nuestra sala, ya que es simétrica y esto supondrá una distribución menos uniforme.

Podemos concluir que dos salas con el mismo volumen tendrán el mismo número de modos propios, pero su distribución será distinta según su forma. Una sala con paredes irregulares provocará una respuesta más uniforme. Debemos evitar salas de formas cúbicas, y que una de las medidas de una pared sea múltiplo de otra (aspecto que se evita en nuestra sala).

3.5. TEORÍA PSICOACÚSTICA

3.5.1. PRINCIPIOS

Es la parte de la acústica encargada de examinar y modelar las características de la audición humana que permiten localizar e identificar la fuente de un sonido percibido.

El aparato auditivo humano no es igual en todos los individuos, un mismo sonido puede producir distintas sensaciones sonoras. Las medidas se basan en experiencias empíricas realizadas en condiciones muy específicas, por lo que no se podrá ajustar una mala o buena escucha en una sala, al ser totalmente subjetivo.

Tendremos que tener clara la diferencia entre sonido y audición. La primera hace referencia a las ondas mecánicas elásticas que se producen y propagan por un fluido, generando movimiento vibratorio de un cuerpo (el rango de escucha humana pertenece a los comprendido entre 20 Hz y 20 KHz). La segunda se refiere a los procesos psico-fisiológicos que proporcionan al ser humano la capacidad de oír.

Es decir, el sonido es lo que físicamente se produce y la audición lo que nuestro cerebro interpreta de ello.

3.5.2. EL OÍDO COMO PARTE FUNDAMENTAL

Se hace esencial conocer el comportamiento del oído para entender cómo se produce la audición y así adaptar la sala para una escucha óptima.

El oído no se comporta de forma lineal, tiene distinta sensibilidad para las diferentes frecuencias, siendo más sensible a frecuencias medias.

Esto se muestra en las curvas isofónicas que analizan la impresión subjetiva para una determinada intensidad acústica.

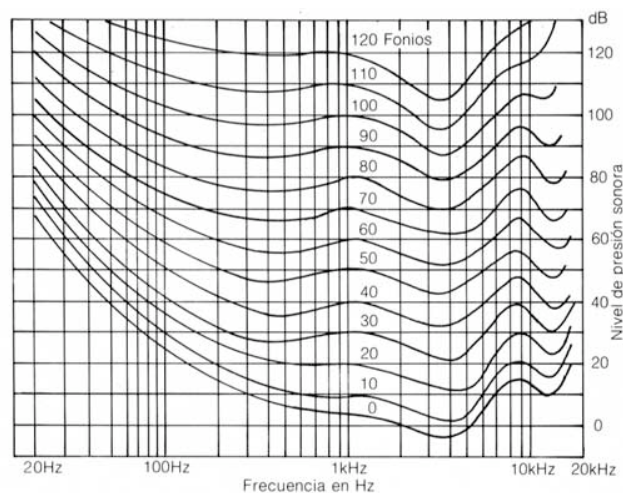


Fig. 3.8.: Curvas isofónicas

Vamos a tratar algunos conceptos imprescindibles para el estudio del comportamiento de nuestro oído que luego facilitarán las cosas a la hora de acondicionar nuestra sala.

3.5.2.1. Influencia de los pabellones auditivos

La forma asimétrica de la oreja y sus circunvoluciones afectan en cómo es percibido el sonido según su frecuencia. En ella se producen retardos, difracciones y resonancias, que conducen a variaciones en la respuesta, tanto en tiempo como en frecuencia, del sonido recibido a la entrada de los pabellones auditivos. Estos cambios se modelan mediante los filtros HRTF (Head Related Transfer Functions); un par de funciones de transferencia (una para cada oído) que no sólo recogen las peculiaridades del oído externo, sino también los fenómenos de reflexión y difracción que ocurren en la cabeza, torso, hombros, etc.

Gracias a estos dos magníficos transductores humanos, es posible

discernir el origen del sonido en el plano de elevación (arriba-abajo) y resolver las ambigüedades del plano azimutal (delante-detrás). Para el primer problema se utiliza la información recogida en cada oído, mientras que para el segundo se recurre a la comparación entre lo percibido por ambos oídos.

3.5.2.2. Influencia de otros sentidos y de la memoria

El hecho de poder ver la fuente, evidentemente aclara cualquier duda sobre su posición. Aunque también puede inducir a confusión si, por ejemplo, vemos el posible foco de emisión y, sin embargo, percibimos que el sonido procede de otro lugar. Esto es un problema que debe ser considerado en las auralizaciones de las simulaciones acústicas (se verán en el siguiente capítulo). En el caso de una sala de cine, al tener la proyección de la película en frente, la sensación subjetiva será que el sonido, normalmente, proviene de ella.

Y puesto que el cerebro es el destinatario último de toda la información recogida por los sentidos y el encargado de interpretarla, la percepción de un sonido es diferente en cada individuo. Jugando un importante papel la memoria.

3.5.2.3. Umbrales de audición y dolor

Hay que tener en cuenta que el oído tiene unos límites inferior (por debajo no se percibe sonido) y superior (por encima se produce dolor), que marcarán las potencias del sistema de refuerzo sonoro:

- Umbral de audición

Es la curva inferior por debajo de la cual no se perciben estímulos acústicos. El valor de este umbral depende de la frecuencia y del nivel de presión sonora.

El nivel de presión sonora es el siguiente:

$$L_p = 20 \log \left(\frac{p}{p_0} \right) \quad (\text{Ec. 3.28.})$$

Donde:

$p_0: 2 \times 10^{-5} \text{ Pa}$.

p : valor eficaz de potencia.

El umbral de audición también depende del ángulo de incidencia del sonido, por encima de los 2000 Hz la cabeza perturba la onda porque su anchura es comparable con la longitud de onda.

Los límites de frecuencia que el sujeto es capaz de captar dependen de la agudeza auditiva del individuo, y ésta de su edad. El límite superior se encuentra en 16 kHz y el inferior en 20 Hz.

- Umbral de dolor

Es la curva superior a partir de la cual el sonido produce dolor o incluso daños en el sistema auditivo. Depende de la frecuencia y presión sonora del mismo modo.

Entre ambos umbrales se encuentra la región audible, dentro de la cual se prestará especial atención a las que son excitadas por la palabra y la música.

3.5.2.4. Nivel de sonoridad y sonoridad

El nivel de sonoridad es el nivel de intensidad que tiene que tener un tono puro de cualquier frecuencia distinta a 1 kHz para que al oyente le parezca que tiene la misma intensidad sonora que el tono de 1 kHz.

No es una medida absoluta, es la comparación de un sonido con otro estandarizado.

Para medir el nivel de sonoridad se utilizan los fonos. Un fono está definido como la sonoridad de un sonido senoidal de 1 KHz con un nivel de presión sonora de 0 dB(SPL). De esta forma 0 dB es igual a 0 fonos y 120 dB a 120 fonos. El fono no sirve para comparar la sonoridad de dos sonidos diferentes, hace referencia a la sonoridad de un determinado sonido.

El oído analiza el espectro y la sonoridad de la parte baja del rango frecuencial por separado de la alta, de este modo la sonoridad se duplica al sumar señales igualmente sonoras de distintas partes del espectro.

Un aumento de 10 fonos en el nivel de sonoridad corresponde a una duplicación de la sonoridad.

La sonoridad es la medida subjetiva de la intensidad con la que un sonido es percibido por el oído humano, permitiendo ordenar los sonidos en una escala de fuerte a débil.

Para medir la sonoridad se utiliza el son. El son está definido como la sonoridad de un sonido senoidal de 1 kHz con un nivel de presión sonora de 40 dB(SPL). El son es capaz de establecer la relación real de sonoridad de dos sonidos diferentes.

Por debajo de 40 fonos el nivel sonoro aumenta mucho más rápido que la presión sonora, por lo que la impresión acústica de la sala depende mucho de la sonoridad.

3.5.2.4. Timbre

Es la cualidad del sonido que nos permite diferenciar un sonido de otro con la misma frecuencia fundamental (tono), e intensidad.

Los sonidos simples o tonos puros son ondas sinusoidales de una frecuencia determinada. Sin embargo en la naturaleza no existe ese sonido puro, libre de armónicos.

Cada sonido está compuesto por un conjunto de armónicos. El timbre depende de la cantidad de armónicos que tenga ese sonido emitido y de la intensidad de cada uno de ellos, de esta forma, aunque dos sonidos tengan la misma frecuencia, se diferencian por los distintos armónicos excitados.

Los armónicos varían según la fuente, eso nos permite diferenciar entre dos instrumentos aunque estén tocando la misma nota.

3.5.2.5. Enmascaramiento

Es un efecto que sucede cuando percibimos dos o más sonidos que son generados simultáneamente o muy cercanos entre ellos, y en el que uno es predominante y no deja percibir a los demás.

- Tipos de enmascaramiento

- Enmascaramiento temporal:

Se produce cuando un tono suave se encuentra cercano en el tiempo a otro de amplitud más elevada, dejándose de percibir el primero.

El pre-enmascaramiento se da cuando llega antes el tono suave, siendo enmascarado por el de mayor amplitud.

El post-enmascaramiento se da cuando llega después el tono suave, siendo igualmente enmascarado por el de mayor amplitud.

- Enmascaramiento frecuencial:

Se produce cuando dos tonos llegan de forma simultánea al oído, quedando enmascarado uno por el otro dependiendo de sus frecuencias.

- Efectos enmascarantes del sonido

Una banda estrecha de ruido enmascara más que un tono puro de la misma intensidad y frecuencia.

A niveles bajos, el enmascaramiento está confinado en una banda claramente estrecha alrededor de la frecuencia central del ruido enmascarante.

El efecto de enmascaramiento no es simétrico alrededor de la frecuencia enmascarante, las frecuencias superiores serán más fácilmente enmascaradas.

3.5.3. AUDICIÓN ESPACIAL CON FUENTES MÚLTIPLES EN ESPACIOS CERRADOS

En nuestra sala tenemos un sistema de sonido 7.1. (se explica en el apartado 7) con múltiples fuentes. Es bueno estudiar cómo se comporta nuestro oído frente a esta forma de radiar, la impresión espacial que nos proporciona y los defectos acústicos producidos.

Empezaremos estudiando los sucesos auditivos cuando radian dos fuentes porque, aún sin ser el sistema utilizado en la sala, resulta más sencillo para su comprensión.

3.5.3.1. Sucesos auditivos cuando emiten dos fuentes

Las señales de entrada al oído son la superposición de componentes que se originan en cada fuente sonora individual.

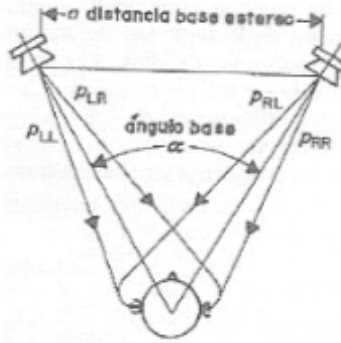


Fig. 3.9.: Composición de una fuente estéreo y el oyente

Para indicar la similitud entre señales se usa la función de correlación cruzada normalizada:

$$\Phi_{x,y} = \frac{x(t)y(t-\zeta)}{X_{RMS}Y_{RMS}} \quad (\text{Ec. 3.29.})$$

Dos señales son coherentes cuando su $\Phi_{x,y} = 1$ para todo retardo ζ .

Esto sucede cuando ocurre:

- Que sean señales iguales.
- Iguales pero con amplitudes distintas no dependientes de la frecuencia.
- Que tengan un retardo ζ no dependiente de la frecuencia.
- Que estén desfasadas entre 0° y 180° (misma envolvente).

El resto de señales son o parcialmente coherentes o incoherentes.

- Dos fuentes radiando señales coherentes

Existen tres casos:

- Aparece un suceso auditivo cuya posición depende de ambas fuentes y de las señales radiadas (fuente fantasma).
- Aparece un suceso auditivo cuya posición está determinada por una de las fuentes.
- Aparecen dos sucesos, cada uno dependiente de la señal y posición de las fuentes.

- Localización suma:

Si emitimos señales idénticas con retardo nulo, se percibe un único suceso auditivo situado en un plano medio.

Un retardo o atenuación de una de las señales hace que el suceso auditivo se desplace hacia el altavoz cuyas ondas son más potentes o llegan primero al oyente.

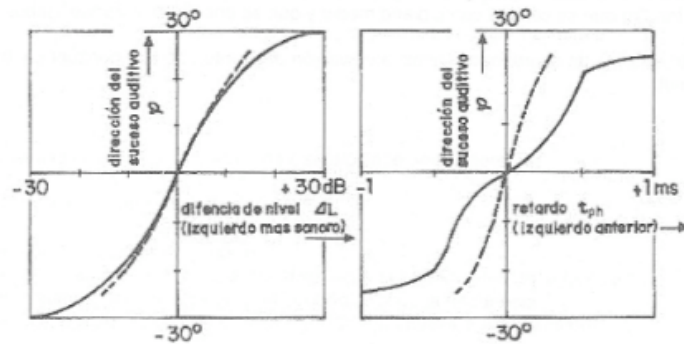


Fig. 3.10.: Relación entre la dirección del suceso auditivo y la diferencia de nivel y el retardo respectivamente

- Ley del primer frente de onda:

Al colocar dos altavoces en posición estereofónica, ambos radiando señales no periodicas coherentes con el mismo retardo e intensidad, el suceso auditivo se coloca en el punto intermedio entre ambas.

Si el retardo de uno de ellos va aumentando respecto al otro, la dirección del suceso se desplaza al altavoz que no tiene retardo, y que por tanto, su señal llegará antes.

Si el retardo es mayor a un milisegundo la posición del suceso auditivo dependerá de la posición y señal de la que llegue primero.

Si el retardo de las señales excede un límite superior aparecen entonces dos sucesos auditivos, ecos.

- Umbral de enmascaramiento:

Cuando el nivel de la señal reflejada en una superficie es igual al del sonido primario, la reflexión supera el umbral de enmascaramiento, a pesar de su retardo.

- Si el retardo es mayor o igual a 1 ms el primer rayo parece más sonoro de lo que realmente es.
- Para que la reflexión sea audible se debe disminuir su potencia de modo que el umbral de enmascaramiento se corresponda con la diferencia de nivel necesaria para que la reflexión sea audible.

○ Umbral de eco:

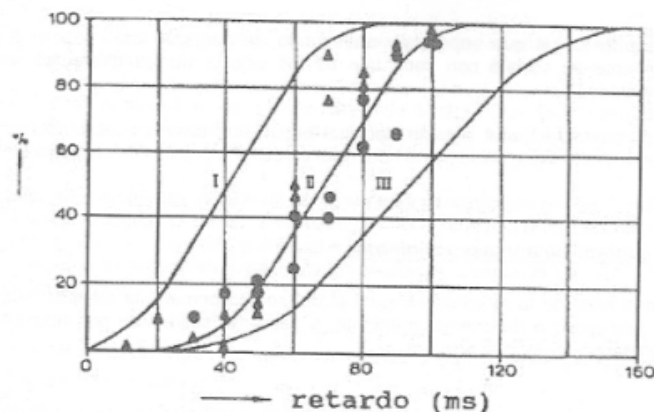
Cuando el retardo de una señal es mayor a 30 ms, el suceso se divide en dos. De esta forma al segundo suceso se le llama eco y al retardo más corto para el que ocurre esto, umbral de eco.

3.5.3.2. Ecos

En la sala 25 del Kinépolis hubo un problema de ecos que se detectó una vez construida y que supuso un cierto retrasado en su puesta a punto. El problema concreto de la sala se profundizará en el apartado 7, en el presente procederemos a explicar en qué consiste este defecto acústico.

- Molestias debido a los ecos

Los experimentos que realizó Hass con la palabra determinaron el porcentaje de personas molestas por la reflexión, en función de su retardo con respecto al primer frente de onda y de la velocidad de elocución del emisor.



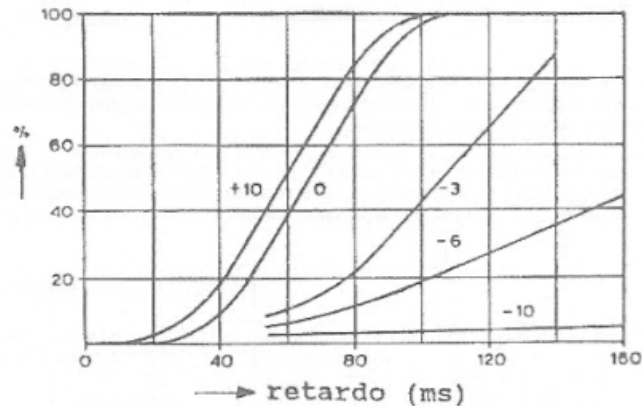


Fig. 3.11.: Relación entre el porcentaje de personas molestas por el eco y el retardo del mismo

Las molestias sufridas son menores en la música que en la palabra respecto al retardo. En nuestra sala, de hecho, únicamente se producían ecos en escenas dialogadas, nunca cuando suena música.

La molestia producida por el eco depende del tipo de señal, el nivel de la misma, el retardo de la reflexión y la dirección proveniente del sonido.

Se producirá enmascaramiento del eco cuando al crecer el nivel de éste, el retardo disminuye.

- Para señales continuas el retardo del eco es mayor que para impulsos.
- Para la palabra el umbral de eco está en 20 ms.
- Cuanto menor sea el tiempo de subida de la señal menor será el retardo del eco.
- Para un ruido de banda estrecha se produce eco con retardos más cortos cuanto más alta sea la frecuencia central.
- Si el nivel de la reflexión crece, el eco permanecerá aún teniendo un retardo menor.

- Condiciones para la aparición de ecos

El eco es una señal repetida que da la sensación de venir de una posición diferente de la proveniente a causa de su intensidad sonora y su tiempo de llegada. Para que se dé, debe llegar con un retardo tal, que el sonido directo haya dejado de ser percibido por el oyente y su nivel sonoro sea con respecto a la señal original, percibido por el oyente.

En la siguiente figura se representa la diferencia de niveles que debe de existir entre señal directa y eco para que éste sea percibido en función de su retardo. Representa el umbral de enmascaramiento.

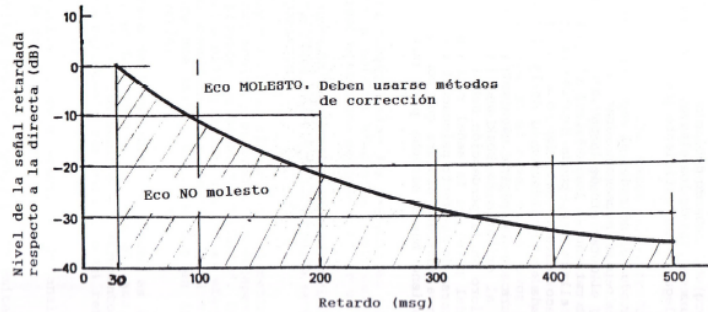


Fig. 3.12.: Tabla que muestra si el eco es molesto en función del nivel de la señal y su retardo

Su límite de perceptibilidad es el límite de retardo que considera que la reflexión refuerza la fuente o se convierte en eco. Suele rondar los 50 ms o los 17 metros de ida y vuelta. Por tanto en una sala de 8.5 metros se podrán dar eco a causa de las reflexiones. Las medidas de nuestra sala son muy superiores a ésta (47.5 metros de largo), por lo que es relativamente sencillo que podamos tener este problema, que habrá que solucionar de alguna forma.

- Los ecos se perciben cuando están por encima del límite y además tienen un nivel mayor al ruido de fondo.
- Para que el eco se escuche las superficies de la sala deben ser poco absorbente o cóncavas.
- Un altavoz distante puede producir un eco artificial.

- Tipos de ecos

Vamos a ver alguno de los tipos de ecos que existen de manera breve para hacernos una idea global, aunque no todos estos se producían en nuestra sala:

- Eco aislado:

Denominado también rebote. Aparecen por reflexiones en la pared posterior al ser ésta curva o incidir el rayo sobre un ángulo formado por la pared y el techo. Son muy molestos y se diagnostican con los ecogramas.

- Ecos múltiples:

Rebotes producidos de modo sucesivo en el tiempo, pero lo suficientemente espaciados para que el oído pueda percibirlos.

- Eco valla o tonal:

Ecos tan juntos en el tiempo que el oído los capta como uno solo.

- Reflexiones repetitivas:

El eco proviene de un rayo que traza una y otra vez el mismo recorrido.

- Eco de aleteo:

Se producen entre dos superficies paralelas no muy distantes entre sí (menos de 7 metros) o en techo abovedados de radio $r=2h$ y $r=4/3h$ (r : radio de la bóveda; h : altura de la misma).

El eco puede no ser molesto si el retardo es menor a 50 ms o la distancia es menor a 17 metros de ida y vuelta.

- Inhibición del sonido primario:

Para un retardo de 20 ms y un nivel de 40 dB mayor que el rayo primario se produce un enmascaramiento de éste, escuchándose solamente el eco. Esto nunca ocurre cuando el nivel de los dos rayos es el mismo.

3.5.3.2. Influencia del grado de coherencia

Si se emiten dos señales de banda ancha donde la correlación entre ambas 'K' puede variar entre 0 y 1:

- $K=1$: aparece un suceso auditivo en el centro del plano medio.
- $1 > K > 0.4$: la posición permanece en el centro pero se dispersa el área.
- $K=0.4$: las componentes del suceso auditivo se producen prácticamente sobre la totalidad de la mitad superior.
- $K < 0.4$: aparecen dos sucesos auditivos.

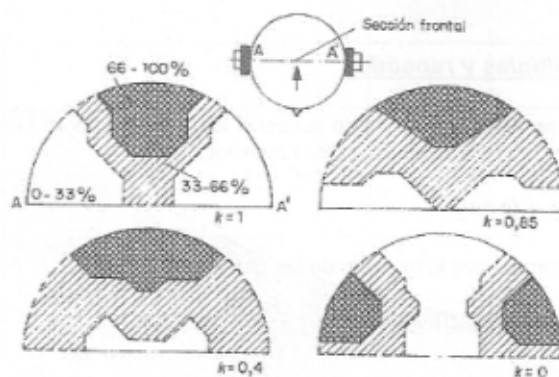


Fig. 3.13.: Sucesos auditivos a partir del grado de coherencia

Si se le añade ruido se dificultará la localización del suceso auditivo. Si casi toda la señal es incoherente se formarán dos sucesos.

Licklider añadió además una fuente de palabra y sacó las siguientes conclusiones:

- El oído es capaz de discriminar de señales parcialmente coherentes sus componentes coherentes y crear un suceso auditivo con cada una de esas componentes.
- Si además se añaden señales incoherentes, los sucesos auditivos se localizan con mayor dificultad.
- Si las señales de entrada al oído tienen componentes incoherentes, se crea un suceso auditivo independiente por cada señal.

3.5.3.4. Impresión espacial

Es la imagen conceptual que el sujeto se crea del tipo, tamaño y propiedades de la sala cuando percibe el campo sonoro existente.

Conclusiones de Reichardt y Schmidt:

- Es necesario un número no muy alto de reflexiones laterales para obtener una buena impresión espacial.
- La distribución uniforme de las ondas no mejora la localización.
- La impresión de escucha espacial se construye con pocas reflexiones si:
 - El sonido reflejado es mutuamente incoherente.
 - Las intensidades sobrepasan cierto nivel.

- El retardo de las reflexiones respecto con el sonido directo es menor a 100 ms.
- Las reflexiones llegan desde posiciones laterales.

3.5.4. PARÁMETROS OBJETIVOS

Hasta ahora hemos comentado los criterios puramente subjetivos de la teoría psicoacústica, pero en ésta también se consideran parámetros numéricos para la medida de la calidad del campo sonoro. Vamos a estudiar de manera breve tres campos: criterios basados en la estructura temporal, criterios basados en la molestia del eco y criterios basados en la reverberación.

Algunos de estos valores los utilizaremos después en la simulación de la sala para analizar la calidad acústica.

3.5.4.1. Criterios basados en la estructura temporal de la respuesta al impulso

- Intervalo inicial de retardo

Es el tiempo que transcurre desde que llega el sonido directo, hasta que se capta la primera reflexión.

Beraneck concluyó que cuanto menor fuese este intervalo mejor sería la escucha en la sala.

No sólo son importantes el rayo directo y la primera reflexión, el resto de reflexiones que se originan a los 50 ms, valor que se corresponde con el límite de perceptibilidad, también tienen su importancia. El conjunto de lo anterior se denomina sonido útil.

- Distinción

Relación del sonido útil con el sonido total.

$$D = \frac{\int_0^{50} p(t)^2 dt}{\int_0^{\infty} p(t)^2 dt} \quad (\text{Ec. 3.30.})$$

Este índice es utilizado para la palabra y toma el valor igual a la unidad en campo libre.

- Índice de reverberación

Es la relación del sonido reverberante con el inicial, medido en dB y cuyo valor depende de la señal.

$$R = 10 \log \left(\frac{1-D}{D} \right) \quad (\text{Ec. 3.31.})$$

- Índice de claridad

Reichardt optó por un margen de tiempo inicial de 80 ms en lugar de los 50 ms y definió así la claridad:

$$C = \frac{\int_{80}^{80} p(t)^2}{\int_{-\infty}^{\infty} p(t)^2} dt \quad (\text{Ec. 3.32.})$$

- Relación señal a ruido

En estos índices se produce el problema de que un ligero desplazamiento temporal de una reflexión más o menos potente puede hacer que ésta no quede incluida en el margen de 50 u 80 ms, por tanto Loechner y Borges incluyeron un nuevo factor de ponderación que se movía entre la primera reflexión y la posterior a 95 ms. De esta manera:

$$SNR = \frac{\int_{95}^{95} p(t)^2}{\int_{-\infty}^{\infty} p(t)^2} dt \quad (\text{Ec. 3.33.})$$

3.5.4.2. Criterios basados en la molestia del eco

Niese tuvo en cuenta las observaciones psicológicas del oído para representar la respuesta al impulso junto con la caída exponencial. Consideró perjudiciales aquellas áreas de impulsos que, después de un retardo de 33 ms, se encuentran

por encima de la curva de caída. Esta curva está basada en la reverberación y una constante adicional de tiempo del oído.

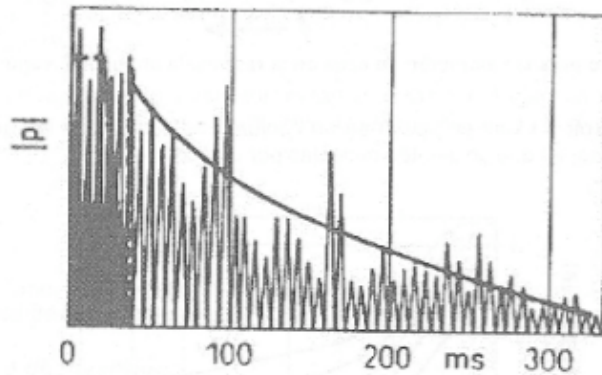


Fig. 3.14.: Gráfica donde se muestran las reflexiones molestas debido al nivel de las mismas

El coeficiente de eco se obtiene contabilizando las áreas perjudiciales S (áreas de impulsos que, después de 33 ms, se encuentran por encima de la línea de perceptibilidad del oído) y las útiles N:

$$E = \frac{S}{S + N} \quad (\text{Ec. 3.34.})$$

Este coeficiente tiene un problema manifiesto, y es que, no tiene en cuenta que la existencia de numerosos picos produce el mismo eco que una única reflexión potente que sería más molesta.

3.5.4.3. Criterios basados en la reverberación

Se centra en cómo influye el tiempo que se prolonga la señal acústica una vez ha cesado la fuente de emitir. Para medir la caída del sonido en ese tiempo existen distintos índices:

- Tiempo de reverberación inicial

Es el tiempo necesario para que se produzca una caída de 60 dB, calculándola a partir de una recta cuya pendiente es similar a la curva de caída de los primeros 100 ms o 15 dB.

En alta frecuencia las curvas se aproximan a rectas. Esto no ocurre en baja frecuencias.

- EDT

Early Decay Time, es el tiempo de reverberación inicial calculado a partir de los primeros 10 dB de la curva de caída.

- Índice de inversión

Relacionado con la música a diferencia de los dos anteriores.

$$II = \frac{EDT_{sala}}{EDT_{escenario}} \rightarrow II < 1 \quad (\text{Ec. 3.35.})$$

4. CARACTERÍSTICAS ACÚSTICAS DE LAS SALAS

Hay que conocer qué características debe cumplir la sala para que el espectador reciba una señal clara y nítida, optimizando su calidad para que el disfrute sea total, ya que una sala de cine debe ser acogedora acústicamente.

Para ello es necesario comentar una serie de parámetros que definen la calidad acústica de las salas.

En nuestro estudio de la sala efectuaremos, a través del programa EASE, la simulación de cada uno de estos parámetros para analizar si los requisitos de calidad necesarios están cubiertos.

Por comodidad, repetiremos alguna formulación ya incluida anteriormente.

4.1. PARÁMETROS ACÚSTICOS

4.1.1. NIVEL DE PRESIÓN SONORA

Es un parámetro usado para dimensionar el campo sonoro en un punto dado.

$$SPL = 20 \log_{10} \left(\frac{P_{RMS}}{P_0} \right) \quad (\text{Ec. 4.1.})$$

Donde:

P_{RMS} : presión eficaz del sonido en un punto.

P_0 : presión eficaz de referencia. $2 \times 10^{-5} Pa$.

Se utilizan medidas eficaces (en promedio temporal) en lugar de las absolutas, debido a que la presión sonora fluctúa en el tiempo.

El sonido lo representamos en decibelios por comodidad, debido al análisis logarítmico que realiza el oído. Los valores que manejamos van desde 0 dB (utilizando el umbral de audición como valor de referencia) hasta 135 dB (umbral de dolor).

A la hora de analizar la sala, este parámetro nos permitirá calcular la uniformidad de la misma, conociendo así su calidad acústica. Cuánto más uniforme sea la

distribución del sonido, mejor será. El margen de SPL deberá oscilar 3 dB para que se considere uniforme.

También nos sirve para comparar el SPL con el ruido de fondo. Para que la calidad sea aceptable el SPL tiene que estar 25 dB por encima del ruido de fondo.

4.1.2. RUIDO DE FONDO

Es el sonido que se percibe en una sala cuando no se realiza ninguna actividad en la misma.

Para poder comprender de una manera correcta un mensaje es necesario que la señal útil supere el nivel de ruido de fondo. Éste puede ser de dos tipos:

- Ruido generado en el interior: sistemas de climatización, iluminación, megafonía...
- Ruido procedente del exterior: tráfico, salas adyacentes...

Una de las formas de valorar la aceptabilidad de un ruido en un determinado entorno, es utilizando las curvas de ponderación de ruido (curvas NC, 'Noise Criteria'), que establecen los límites aceptables de ruido en diferentes entornos:

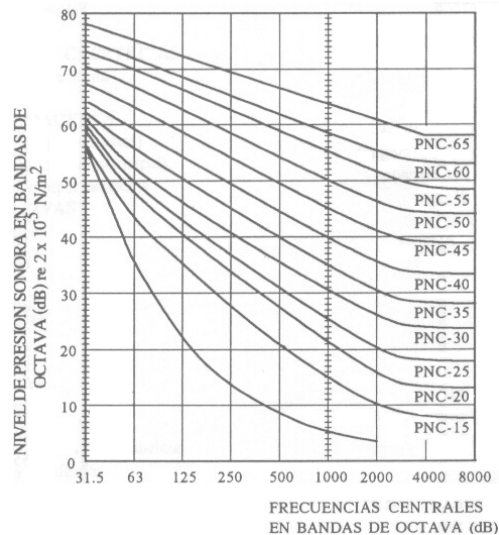


Fig. 4.1.: Curvas NC

En la siguiente tabla aparecen valores recomendados para algunos recintos y su nivel sonoro equivalente:

TIPOS DE RECINTOS	CURVA NC RECOMENDADA	EQUVALENCIA EN dBA
Estudios de grabación	15	28
Salas de conciertos y teatros	15-25	28-38
Hoteles (habitaciones individuales)	20-30	33-42
Salas de conferencias / Aulas	20-30	33-42
Despachos de oficinas / Bibliotecas	30-35	42-46
Hoteles (vestibulos y pasillos)	35-40	46-50
Restaurantes	35-40	46-50
Salas de ordenadores	35-45	46-55
Cafeterías	40-45	50-55
Polideportivos	40-50	50-60
Talleres (maquinaria ligera)	45-55	55-65
Talleres (maquinaria pesada)	50-65	60-75

Fig. 4.2.: Valores de nivel de ruido de fondo recomendables

Este parámetro además de tener que estar 25 dB por debajo del SPL para cumplir con los requisitos mínimos de calidad acústica deberá tener unos valores máximos dependiendo del tipo de sala. En nuestro caso deberá encontrarse en la curva NC 15-25.

4.1.3. TIEMPO DE REVERBERACIÓN

Como ya hemos definido anteriormente, es el tiempo que la energía acústica tarda en caer 60 dB desde que cesa la emisión de la fuente.

Se puede medir este tiempo a partir de la curva de energía-tiempo, aunque deberemos tomar ciertas precauciones, debido a que el ruido de fondo suele ocultar la última parte de esta curva. Por tanto, en la práctica se mide el tiempo que cae 20 o 30 dB y se obtiene el tiempo de reverberación total multiplicando el resultado por 3 o 2, respectivamente.

También podemos estimarlo a partir de las conocidas fórmulas de Sabine, Eyring, Arau, etc... Aunque esto tiene un inconveniente ya mencionado, el valor es independiente de la posición del receptor y sólo es válido en condiciones de campo difuso (misma probabilidad de propagación en cualquier dirección).

La más conocida es la de Sabine:

$$T_{60} = \frac{0.161V}{\sum S_n \alpha_n} \quad (\text{Ec. 4.2.})$$

Donde:

V: volumen de la sala.

S_n : superficie del material 'n' de la sala.

α_n : coeficiente de absorción del material 'n' de la sala.

También tenemos la de Millington-Sette:

$$T_{60} = 0.161 \frac{V}{\sum \alpha_k S_k} \quad (\text{Ec. 4.3.})$$

Donde:

$$\alpha_k = -\ln(1 - \alpha_n) \quad (\text{Ec. 4.4.})$$

O la fórmula de Eyring:

$$T_{60} = 0.161 \frac{V}{-S \ln \left(1 - \frac{\sum \alpha_k S_k}{\sum S_k} \right)} \quad (\text{Ec. 4.5.})$$

Existen otros métodos de cálculo que han sido basados en estudios realizados por diferentes autores en función de su uso:

- Sala para palabra vacía:
 - Knudsen: $T_{60} = 0.32 + 0.17 \log V$ (Ec. 4.6.)
- Sala para concierto vacía:
 - Watson: $T_{60} = 0.75 + 0.12 \sqrt[3]{V}$ (Ec. 4.7.)
- Sala para concierto llena:
 - Kosten: $T_{60} = 0.163 \frac{V}{S_t \alpha_{eq}}$ (Ec. 4.8.)

- Kuttruff: $T_{60} = 0.15 \frac{V}{S_t}$ (Ec. 4.9.)
- Beraneck: $T_{60} = 0.14 \frac{V}{S_t}$ (Ec. 4.10.)

Cada recinto específico tiene un valor de tiempo de reverberación óptimo diferente. En la siguiente tabla se muestra su valor para algunas funcionalidades:

TIPO DE SALA	TRmid,Sala Ocupada(seg.)
Sala de conferencias, aulas	0,7 - 1,0
Sala polivalente	1,2 - 1,5
Locutorio de radio	0,2 - 0,4

Fig. 4.3.:Tiempo de reverberación óptimo para distintos tipos de sala

Para salas de cine deberá encontrarse el tiempo de reverberación entre 0.9 y 1.2 segundos.

También deberemos tener en cuenta que cuanto mayor exigencia de inteligibilidad de la palabra requiera una sala, menor tendrá que ser el tiempo de reverberación óptimo, y además, es necesario que sea lo más constante posible con la frecuencia, sobre todo para bajas frecuencias.

Por otra parte, es recomendable que la variación de este tiempo con el grado de ocupación de la sala sea pequeña, para que las condiciones acústicas sean aceptables en cualquier circunstancia. Este hecho se hace especialmente importante para una sala de cine, ya que, esté la sala vacía o llena de público, deberemos percibir la misma calidad acústica.

Existen dos parámetros que surgen a partir del tiempo de reverberación y que se utilizan en salas con fines musicales. Es interesante conocerlos debido a que en una sala de cine se reproduce una gran cantidad de música durante la proyección de películas:

4.1.3.1. Calidez acústica

Es la relación entre los tiempos de reverberación de las frecuencias bajas y medias. Se abrevia como BR.

$$BR = \frac{T_{60}(125) + T_{60}(250)}{T_{60}(500) + T_{60}(1000)} \quad (\text{Ec. 4.11.})$$

Representa la influencia de los sonidos graves de una sala, lo que subjetivamente está ligado a la calidez y suavidad de la música escuchada.

Los valores recomendados por Beranek:

Si $T_{60}=1.8$ segundos : $1,10 \leq BR \leq 1,45$

Si $T_{60}=2.2$ segundos : $1,10 \leq BR \leq 1,25$

Para valores intermedios los resultados se obtienen por interpolación de los anteriores.

4.1.3.2. Brillo

Es la relación entre los tiempos de reverberación de las frecuencias altas y medias.

$$Br = \frac{T_{60}(2K) + T_{60}(4K)}{T_{60}(500) + T_{60}(1K)} \quad (\text{Ec. 4.12.})$$

Representa esta vez la influencia de los sonidos agudos de una sala, midiendo la riqueza de un sonido claro y brillante.

Beranek recomienda un valor de $Br \geq 0,87$. Aunque debemos tener en cuenta que un sonido excesivamente brillante suena artificial resultando molesto, por lo que el brillo no debe superar la unidad. Cuanto mayor sea la absorción en el aire en altas frecuencias (la humedad relativa ayuda a una mayor absorción) se cumplirán mejor estas premisas.

4.1.4. EARLY DECAY TIME (EDT)

Es el tiempo que pasa en caer 10 dB el nivel de presión sonora desde que la fuente deja de emitir. Se tiene que multiplicar por seis si se desea obtener el tiempo de reverberación.

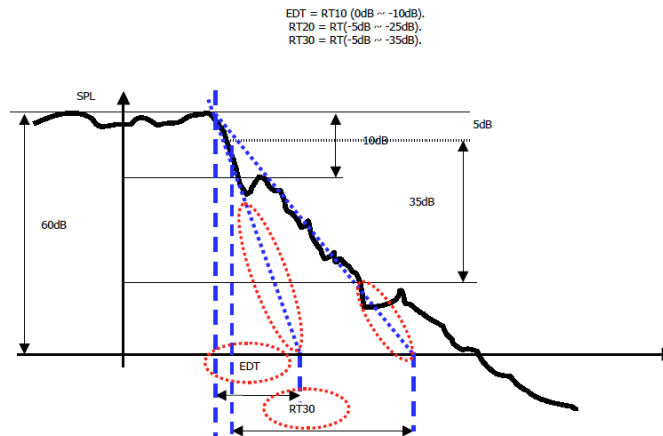


Fig. 4.4.: Comparación del EDT con el RT

El EDT mide la reverberación percibida (subjetiva) en contraposición del tiempo de reverberación que mide la real. Por tanto, para obtener el grado de viveza de una sala es mejor el valor EDT.

Un valor inferior del EDT respecto el tiempo de reverberación supondrá, subjetivamente, que la sala es más apagada de lo que deduce el valor del tiempo de reverberación.

En puntos donde se concentran las reflexiones o puntos con una mayor absorción que el resto supondrán valores menores del EDT.

Es aconsejable que el EDT para las frecuencias de 500 Hz y 1 KHz de una sala vacía sean similares a los valores del tiempo de reverberación para esas frecuencias.

4.1.5. SONORIDAD

Hay dos parámetros denominados sonoridad y que son totalmente excluyentes:

4.1.5.1. Speech sound level (S)

Utilizado para salas destinadas a la palabra. Mide la amplificación que una sala produce de un mensaje de voz.

Es la diferencia entre el nivel medio de presión sonora en un punto de la sala y el nivel de referencia (39 dB), cuando la fuente es una persona situada en un escenario. El nivel de referencia viene dado por el nivel medio de presión sonora que existiría a 10 metros de la fuente si ésta estuviese en condiciones de campo libre.

$$S_{receptor} = SPL_{receptor} - 39(dB) \quad (\text{Ec. 4.13.})$$

Los valores recomendados por Barron son:

- Cuando el oyente está colocado de forma frontal a la fuente:

$$4 \leq S_{mid} \leq 8 \text{ dB}$$

- Cuando el oyente está situado de forma lateral a la fuente:

$$2 \leq S_{mid} \leq 6 \text{ dB}$$

El valor S debe ser siempre positivo, por lo que en cualquier punto de la sala el valor de presión sonora debe ser mayor a 39 dB.

4.1.5.2. Strength factor (G)

Empleado en recintos orientados a la audición de música. Mide de la misma manera la amplificación que una sala produce sobre la música.

Es la relación entre el nivel de presión sonora total en un punto de la sala, donde radia una fuente omnidireccional, y el nivel de presión sonora a 10 metros de la misma fuente en condiciones de campo libre.

$$G_{receptor} = SPL_{receptor} - SPL(10m)_{c.libre} \quad (\text{Ec. 4.14.})$$

Se calcula para las frecuencias de 500 Hz y 1000 Hz.

Los valores recomendados para una sala de conciertos según Beranek es:

$$4 \leq G_{mid} \leq 5,5 \text{ dB}$$

Para ambos parámetros S y G, los principales factores que influyen en su medida son:

- La distancia del receptor a la fuente: disminuyen al aumentar la distancia.
- El área ocupada por el público: disminuyen al aumentar la absorción debida al público.

- El nivel del sonido reverberante: aumentan al aumentar el nivel de reverberación, aunque disminuye la inteligibilidad.
- Las primeras reflexiones: aumentan al aumentar el número de primeras reflexiones, aumentando a su vez la inteligibilidad.

Para el caso concreto de la sala, estos dos factores son interesantes, debido a que además de desempeñar su principal función como sala de cine, es utilizada para conferencias y pequeños conciertos.

4.1.6. CLARIDAD

Existen dos parámetros para la medición de la proporción efectiva de las primeras reflexiones.

4.1.6.1. Claridad de la voz (C50)

Destinada a salas dedicadas a la palabra. Mide la relación entre la energía sonora recibida durante los primeros 50 ms después de recibir el sonido directo (incluido) y la energía restante.

$$C_{50}(dB) = \frac{E_{t_0-50ms}}{E_{50ms-\infty}} \quad (\text{Ec. 4.15.})$$

Según Marshall para caracterizar la sala con un valor único se utiliza el 'Speech Average' que se calcula como:

$$C_{50}(SA) = 0.15C_{50}(500Hz) + 0.25C_{50}(1kHz) + 0.35C_{50}(2kHz) + 0.25C_{50}(4kHz) \quad (\text{Ec. 4.16.})$$

Para una inteligibilidad aceptable:

$$C50(\text{Speech Average}) \geq 2 \text{ dB}$$

Según aumente este valor mayor será la sonoridad y la inteligibilidad.

Se puede aumentar la claridad de la voz disminuyendo el nivel de sonido reverberante.

Para nuestra sala los valores deberán oscilar entre -4 y 0 dB en las bandas de 500, 1000 y 2000 Hz.

4.1.6.2. Claridad musical (C80)

Se usa para salas destinadas a música. Mide la relación entre la energía sonora recibida durante los primeros 80 ms después de recibir el sonido directo (incluido) y la energía restante.

$$C_{80}(dB) = \frac{E_{t_0-80ms}}{E_{80ms-\infty}} \quad (\text{Ec. 4.17.})$$

Como valor representativo se utiliza el 'Music Average':

$$C_{80}(MA) = \frac{C_{80}(500Hz) + C_{80}(1kHz) + C_{80}(2kHz)}{3} \quad (\text{Ec. 4.18.})$$

Los valores recomendados son los siguientes:

- Para sala vacía según Beranek:

$$-4 \leq C80(\text{Music Average}) \leq 0 \text{ dB}$$

- Para sala llena según Marshall:

$$-2 \leq C80(\text{Music Average}) \leq 2 \text{ dB}$$

Ambos parámetros varían con el tiempo de reverberación, disminuyendo a medida que éste aumenta.

Es importante cumplir los requisitos mínimos para ambos parámetros de claridad (tanto C50 como C80) debido a que en una sala de cine se intercalan continuamente los diálogos con los temas musicales.

4.1.7. DEFINICIÓN

Se utiliza únicamente para salas destinadas a la palabra. Mide la relación entre la energía sonora recibida durante los primeros 50 ms después de recibir el sonido directo (incluido) y la energía total.

$$D = \frac{E_{t_0-50ms}}{E_{t_0-\infty}} \quad (\text{Ec. 4.19.})$$

Es relacionable con la claridad de voz de la siguiente manera:

$$D = \frac{1}{1 + 10^{-C_{50}/10}} \quad (\text{Ec. 4.20.})$$

Éste valor disminuye al aumentar la distancia del oyente respecto de la fuente, ya que aumenta así el nivel del sonido reverberante y, por tanto, la proporción de energía de las primeras reflexiones disminuye.

Debido a la directividad de la voz la definición es mayor cuando el oyente se sitúa de manera frontal a la fuente.

El valor óptimo es siempre mayor a 0.5 dB y se recomienda que sea uniforme en toda la sala.

4.1.8. ALCONS

Es un parámetro que se utiliza para cuantificar la inteligibilidad de la palabra. Significa 'Articulation Loss of Consonants', por tanto, es el porcentaje de pérdida de la articulación de consonantes. Cuanto menor sea el porcentaje, mayor será la inteligibilidad en la sala.

Es cuantificable de la siguiente manera relacionándola con el tiempo de reverberación:

$$\%ALCons = \frac{200r^2RT^2}{VQ} \quad (\text{Ec. 4.21.}) \quad \text{si } r \leq 3.16 \text{ Dc}$$

$$\%ALCons = 9RT \quad (\text{Ec. 4.22.}) \quad \text{si } r > 3.16 \text{ Dc}$$

Donde:

r: distancia de la fuente.

V: volumen de la sala.

Q: directividad de la fuente. Voz humana en posición frontal a la fuente, Q=2.
RT: tiempo de reverberación.

Dc es la distancia crítica:

$$Dc = 0.14\sqrt{QR} \quad (\text{Ec. 4.23.})$$

Donde R es la constante característica de la sala:

$$R = \frac{S \ln(1 - \bar{\alpha})}{(1 - \bar{\alpha})} \quad (\text{Ec. 4.24.})$$

En la práctica se calcula para una única banda de 1/3 de octava, centrada en 2 kHz, que es la zona que más influye en la inteligibilidad de la palabra. Esto supone la desventaja de que el resto de frecuencias son ignoradas.

Por otra parte, el método no contempla algunos factores que afectan dramáticamente la inteligibilidad, incluyendo la relación señal a ruido, el espectro de ruido de fondo, la distorsión, las reflexiones tardías y los ecos, la respuesta de frecuencia del sistema, la compresión, el alineamiento de fase, la ecualización y la potencia acústica. Por tanto, las mediciones de ALcons proporcionan unos resultados demasiado optimistas. Sin embargo, en casos en donde la reverberación o fuertes reflexiones tardías son un problema considerable, pueden ser en ocasiones más útiles y precisas que el test RASTI.

Para que la sala tenga una inteligibilidad aceptable y cubra unos requisitos mínimos de calidad deberá estar entre el 0% y el 11.4%. Es necesario cumplir estos márgenes debido a que los diálogos de la película deben entenderse perfectamente.

4.1.9. STI

Es un parámetro que se utiliza del mismo modo para medir la inteligibilidad de la palabra. Significa 'Speech Transmission Index', puede tomar valores entre 0 y 1, siendo inteligibilidad nula y óptima respectivamente.

Es directamente dependiente del nivel de ruido de fondo, del tiempo de reverberación y del tamaño del recinto.

Para medirlo, el sonido de la palabra se modela como una señal de prueba especial con características representativas de la voz humana, puede ser

descrita como una forma de onda fundamental que es modulada por señales de baja frecuencia. Por lo tanto, se emplea un complejo esquema de modulación de amplitud que genera estas señales de prueba. En la unidad de recepción del sistema de comunicación, la profundidad de modulación de la señal recibida es compara con la profundidad de modulación de la señal de prueba en cada banda, de un número específico de bandas de frecuencia. Las reducciones en la profundidad de modulación se asocia a la pérdida de inteligibilidad.

Se estima de la siguiente forma:

$$STI = \frac{(S/N)_{aparente} + 15}{30} \quad (\text{Ec. 4.25.})$$

Donde la relación señal-ruido aparente de media global actuando en cada banda es:

$$\begin{aligned} (S/N)_{aparente} = & 0.01(S/N)_{aparente}(125\text{Hz}) + 0.042(S/N)_{aparente}(250\text{Hz}) \\ & + 0.129(S/N)_{aparente}(500\text{Hz}) + 0.2(S/N)_{aparente}(1\text{kHz}) \\ & + 0.312(S/N)_{aparente}(2\text{kHz}) + 0.25(S/N)_{aparente}(4\text{kHz}) \\ & + 0.057(S/N)_{aparente}(8\text{kHz}) \end{aligned} \quad (\text{Ec. 4.26.})$$

Para ello se obtiene la relación señal a ruido aparente asociada a cada índice:

$$(S/N)_{ap}(F_0, F_m) = 10 \text{ Log} \left(\frac{m(F_m, F_0)}{1 - m(F_m, F_0)} \right) \quad (\text{Ec. 4.27.})$$

Se hace midiendo la reducción que experimenta el índice de modulación para cada una de las señales y sus frecuencias:

$$|m(F_m, F_0)| \equiv \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{2\pi \cdot F_m \cdot f(F_0)}{13,8} \right)^2}} \cdot \frac{1}{1 + 10^{\frac{S/N(F_0)}{10}}} \quad (\text{Ec. 4.28.})$$

Esta reducción es debida a la reverberación y al ruido de fondo, y se traduce en una pérdida de inteligibilidad.

4.1.10. RASTI

Son las siglas de ‘Rapid Speech Transmission Index’. Surge como una simplificación del STI para reducir el tiempo de cálculo.

Este índice, patentado por la empresa Brüel & Kjaer, se calcula reduciendo el número de frecuencias moduladoras y portadoras.

La siguiente tabla recoge la correspondencia entre la inteligibilidad de la palabra en una sala y su valor de ALCONS y STI o RASTI.

%ALCons	STI / RASTI	Inteligibilidad
0 % – 1.4 %	0.88 – 1	Excelente
1.6 % – 4.8 %	0.66 – 0.86	Buena
5.3 % – 11.4 %	0.5 – 0.64	Aceptable
12 % – 24.2 %	0.36 – 0.49	Pobre
27 % – 46.5 %	0.24 – 0.34	Mala

Fig. 4.5.: Tabla de valores de ALCons y RASTI

4.1.11. ‘INITIAL TIME DELAY GAP’

Es el tiempo comprendido entre que llega el sonido directo y se recibe la primera reflexión.

Según Beranek, está relacionado con la ‘intimidad acústica’ (impresión de que el recinto es de menor tamaño a lo que en realidad es). Es recomendable un límite superior de 20 ms, para una posición central frente al escenario.

Está relacionado también con la textura, para que haya una buena textura tendrá que ser pequeño el ITD Gap.

4.1.12. FACTORES DE BERANEK

Son valores subjetivos, que aún siendo percepciones o sensaciones se pueden relacionar en muchos casos con valores objetivos.

Además de la intimidad o presencia, definición o claridad, brillantez o nitidez ya explicados anteriormente, tenemos los siguientes:

- Viveza

Sala reverberante, cualidad añadida al sonido comparado con el campo libre. La impresión se recalca en medias y altas frecuencias.

- Calor

Viveza en frecuencias bajas, el relleno en tonos bajos. Ocurre cuando en frecuencias menores de 250 Hz el tiempo de reverberación es mayor que para frecuencias comprendidas entre 500 y 1000 Hz. Debe de ser entre un 20 y un 50% mayor. Se da en recintos reducidos.

- Difusión

Distribución direccional de la energía sonora. Es óptima cuando el sonido parece venir de todas las direcciones en parte iguales.

- Mezcla o matiz

Compactación de los sonidos de una orquesta de modo que se perciban como uno solo.

- Proximidad de la respuesta o ataque

La rapidez de la respuesta de la sala se relaciona con las primeras reflexiones de las superficies de la sala y que vuelven al músico. Está relacionado con la intimidad, viveza, difusión, mezcla y eco.

- Textura

Impresión subjetiva por la forma en que llegan las reflexiones. Definida por los retardos y niveles de intensidad del sonido directo.

- Inexistencia de eco

La probabilidad de que no haya eco es mayor en las primeras butacas de salas grandes y en aquellas que el tiempo de reverberación sea corto.

- Inexistencia de ruido

Depende del aislamiento de la sala.

- Amplitud dinámica

Gama de niveles sonoros que se escucha dentro de la sala. Comprende desde el mínimo nivel de ruido ambiente hasta el máximo nivel.

- Calidad tonal

Es la belleza de los tonos y matices. Puede perderse por la desigual absorción en distintas bandas de frecuencia.

- Uniformidad

Supone un campo sonoro del mismo nivel en toda la sala.

4.2. DEFECTOS ACÚSTICOS

Existen numerosos tipos de defectos acústicos: focalización y coloración del sonido, falsa localización de la fuente, los efectos 'seat dip', 'cocktail party', 'tambor', Larsen y de la galería de los susurros entre muchos otros. Como en nuestra sala sólo nos encontramos con el problema de ecos, como expusimos anteriormente y como se explica en el apartado 7, profundizaremos únicamente en este defecto acústico, que ya hemos explicado de forma breve, dejando el resto al margen.

4.2.1. ECOS

Un eco es cualquier reflexión de primer orden que llega con un retardo de 50 ms para salas acondicionadas para la palabra, u 80 ms, para las destinadas a eventos musicales, respecto al sonido directo y con un nivel perceptible. Percibiéndose como una repetición del sonido directo.

Las causas más comunes para que se dé un eco son la geometría de la sala o la incorrecta colocación de altavoces.

Si nos centramos en la geometría, aparecen ecos si:

- Tenemos una pared posterior altamente reflectante a una distancia superior a 8.5 m (mitad de 17 m, que es la distancia que recorre el sonido en 50 ms) en salas destinadas a la palabra, o 13.8 (mitad de 27.6, que es la distancia recorrida en 80 ms) en salas para música.
- Se forma un reflector de esquina entre el techo y la pared posterior. Para que la reflexión originada sea un eco, la fuente debe distar 8.5 o 13.8 m de dicho reflector.

Podemos evitar los ecos con un buen diseño:

- Colocar materiales absorbentes en las superficies conflictivas. Debe ser un porcentaje menor al 10% el área tratada para que no reduzca el tiempo de reverberación y la sonoridad.
- Colocar las superficies en otra posición, o si no es posible, manipular la superficie creando otros ángulos de reflexión para que las reflexiones vayan a zonas menos problemáticas.
- Superponer elementos convexos a las superficies generadoras del eco. En caso de que dicha superficie sea reflectora, el radio de la curva deberá superar los 5 m, sino funcionarán como difusores.

El principal problema para enmascarar un eco lo encontramos en nuestro sistema auditivo. Éste colabora en su detección al recopilar la información sonora para localizar la fuente sonora, una vez que se detecta nos resulta imposible olvidarnos de su existencia.

En nuestro caso concreto, la sala 25 de los cines Kinépolis, el eco se producía en las butacas centrales y debido a una reflexión de tercer orden: la primera reflexión se produce en la pared trasera de la sala, luego en el techo (o viceversa dependiendo de la fila) y por último en la pared donde está situada la pantalla de proyección (ésta es transparente al sonido). De ésta última, el sonido llegaba al espectador con un retardo de 270 ms y una intensidad variable en función de la butaca.

La gama de frecuencias a las que se producía con mayor intensidad el eco eran medias y altas debido a las características acústicas de la pared donde se sitúa la pantalla.

Se producían dos fenómenos que contribuían a aumentar el nivel de la reflexión hasta hacerla perceptible por el espectador:

- En primer lugar, la reflexión en el techo se producía formando un ángulo muy pequeño con la superficie del mismo. Bajo estas condiciones, el material del techo presentaba una absorción muy inferior a la esperada como estándar (establecida para un ángulo de incidencia aleatorio).
- En segundo lugar, la forma de la pared donde se sitúa la pantalla, al no ser completamente recta, producía una concentración de la reflexión sonora hacia la zona central de la sala.

Además la baja absorción del vidrio de la ventana de proyección hacía que la intensidad del sonido reflejado fuese más alta. Este hecho sólo afectaba a las butacas centradas en las últimas filas de asientos.

La solución que se adopta para solucionar este problema en la sala se explica detalladamente en el apartado 7 del proyecto.

4.3. VALORES RECOMENDADOS

Vamos a exponer los valores recomendados para los parámetros acústicos, que ya hemos estudiado anteriormente, de forma que se garantice una calidad acústica mínima de la sala.

La sala 25 del Kinépolis, como ya hemos mencionado, además de estar destinada a la proyección de películas, se utiliza como sala de conferencias para eventos importantes y como sala de conciertos en acústico en presentaciones de discos. De todas formas las conferencias y los conciertos se hacen de forma muy esporádica y de manera mínima, por lo que los valores a cubrir en la sala serán los específicos para salas de cine. Aún así comentaremos los recomendados para los otros dos tipos.

4.3.1. SALAS CINEMATOGRAFICAS

Este tipo de sala es especialmente interesante, porque en la proyección de películas se dan dos sucesos, existe la palabra y la música, por tanto, habrá que llegar a un punto óptimo intermedio.

Además las ondas sonoras vienen de un sistema de altavoces que reproducen unos sonidos previamente grabados en una sala completamente diferente a la que están los espectadores.

- Proceso de grabación:

Las condiciones acústicas en una sala de cine no dependen sólo de la propia sala, sino también del estudio de grabación donde se grabó la película.

Los estudios son locales sin reverberación, una vez grabado el audio hay que introducirle una reverberación artificial.

Las escenas tomadas con una reverberación mayor que la de la sala no supondrán ningún problema, ya que el tiempo de reverberación resultante será prácticamente el de la escena. Las que tengan una reverberación menor se reproducirán al tiempo de reverberación del cine, por tanto es necesario dotar a la sala de reverberación, pero no demasiada. Una atmósfera cargada no contribuirá a la buena reproducción.

- Reverberación y claridad:

En las salas de cine será conveniente llegar a un valor óptimo en el tiempo de reverberación, asegurando una buena calidad, ya que se reproduce tanto diálogos como música.

Para lograr el tiempo de reverberación se puede enfocar de dos maneras:

- Con la relación entre el tiempo de reverberación y la claridad (llegada de un sonido considerado como señal, y lo que llega con retraso como ruido) se establece una relación señal a ruido.
- Hacer que la curva de decrecimiento de la energía sonora del recinto tenga una pendiente doble, más pronunciada al principio para asegurar la claridad y con una caída más lenta al final para alargar la reverberación y hacerla adecuada para la música.

Para que suceda el segundo punto, deberán proporcionarse materiales absorbentes en las superficies de primer y segundo orden de reflexión (techo y partes inferiores de las paredes laterales), para hacer la caída rápida. Y materiales menos absorbentes en las superficies que se encuentran las reflexiones de mayor orden para que la caída sea más lenta. Esto se cumple en nuestra sala (se pueden observar los coeficientes de absorción de cada material en el apartado 7.3).

Para salas grandes, como es nuestro caso, la primera pendiente tendrá un valor en tiempo de 150 ms. En salas pequeñas los tiempos de reverberación óptimos para la palabra y la música son muy similares no será necesario una doble pendiente.

- Ruido de fondo:

El valor aconsejable será entre 25-35 dB.

- Inteligibilidad:

El ALCONS tendrá que ser menor al 8% para que tenga una buena inteligibilidad.

- Diseño de la sala:

La sala 25 que estudiamos ya está diseñada, pero como curiosidad podemos ver los puntos que deberemos evitar para alcanzar una buena calidad acústica de forma más sencilla:

- Formas cóncavas que produzcan concentraciones de sonido.
- Grandes dimensiones que producen un exceso de retardo de las reflexiones.
- Superficies paralelas muy reflectantes que producen ecos batientes.
- Igualdad en las dimensiones que produce modos propios degenerados.

Así la forma más conveniente para una sala grande será la trapezoidal y para salas pequeñas la paralelepípeda cuidando el tratamiento interior y la situación de los altavoces.

4.3.2. SALAS DE CONFERENCIAS

Para que el oyente se encuentre cómodo y no le resulte molesto el sonido o la inteligibilidad se procurará obtener poco ruido de fondo, poco campo reverberante e inexistencia de ecos.

- Ruido de fondo:

Recurriendo a las curvas de ruido, el valor recomendable será de 20-30 dB. Muy parecido al de una sala de cine (25-35 dB).

- Tiempo de reverberación:

Para salas de 100-1000 m³ es recomendable que la reverberación sea entre 0.7 y 1 s de manera uniforme. También parecido a una sala de cine (0.9-1.2 s).

- Ecos:

Deben evitarse para conseguir uniformidad.

- Presión sonora:

Se recomienda que haya 90 dB (+/- 10 dB) para cubrir los picos de señal.

- Uniformidad:

Debe tener una variación máxima de nivel de +/- 3 dB, principalmente en las bandas de 500-2000 Hz en toda la superficie.

- Inteligibilidad:

El ALCONS debe ser menor al 5% para que haya una inteligibilidad buena. Éste es el parámetro más diferente, ya que es necesario que sea un poco menor.

4.3.3. SALAS DE CONCIERTOS

El problema principal de este tipo de sala, es que están valoradas de forma bastante subjetiva. Tenemos distintos conceptos de cómo debe sonar un concierto, o por lo menos las sensaciones que percibimos no son siempre las mismas pese a recibir el mismo estímulo.

- Situación:

Debe ubicarse en un lugar donde el ruido sea el mínimo y que nos permita construir la sala a nuestro antojo. En el Kinépolis no existen problemas de ruido de fondo externos importantes.

- Capacidad:

Entre 600 y 1800 butacas es un número abarcable. La sala 25 del Kinépolis tiene 998.

- Tiempo de reverberación:

Varía dependiendo del tipo de música para la que esté destinada la sala, suele estar entre 1.8 y 2 s en la banda de 500 a 1000 Hz para salas grandes. Es mucho mayor que el de una sala de cine, pero como en el Kinépolis sólo se hacen conciertos en acústico, el tiempo de reverberación puede ser menor.

- Intimidad/presencia:

El tiempo transcurrido entre el sonido directo y las primeras reflexiones debe ser menor de 20 ms, a partir de 35 ms es muy malo.

- Calor:

El tiempo de reverberación a bajas frecuencias debe ser entre un 20 y un 50 % mayor que para altas frecuencias.

- Definición/claridad:

Entre 500 y 2000 Hz debe estar entre -4 y 0. Igual que para el cine.

- Calidez y Brillo:

Para salas con tiempo de reverberación de 2.2 s la calidez deberá estar entre 1.10 y 1.25 y el brillo entre 1.1 y 1.45.

- EDT:

Para frecuencias medias debe rondar el valor del tiempo de reverberación.

- Sonoridad:

Entre 4 y 5.5 dB.

5. REFUERZO SONORO

En una sala de cine es necesario un sistema de refuerzo sonoro para reproducir los sonidos que acompañan a la imagen de las películas, abarcando toda la zona de audiencia con un nivel suficiente.

Se entiende como refuerzo sonoro, aquél que se utiliza para apoyar la fuente directa (en el caso de haberla, no es el nuestro) y es utilizado, además de en cines (apoyando la imagen visual), en lugares como conciertos, teatros o salas de conferencias. Los requisitos que debe cumplir son: una alta fidelidad, recubrimiento uniforme, buena inteligibilidad y concordancia entre la imagen visual y la imagen sonora.

La configuración de los altavoces debe proporcionar una sensación subjetiva de escucha procedente, normalmente, de la pantalla (en nuestro caso).

El ancho de banda en estos sistemas es todo el margen del audio (banda ancha).

5.1. ACÚSTICA BÁSICA DE SALAS

Hay muchos conceptos relacionados con la acústica básica de salas que afecten al refuerzo sonoro, pero nos centraremos en los que se apliquen más tarde en la sala 25.

5.1.1. EFECTO PROCEDENCIA

En un cine es muy importante ordenar las señales en el tiempo para que la imagen auditiva se corresponda con la imagen visual.

Para entender mejor el concepto del efecto de procedencia vamos a simplificar suponiendo un suceso tal que, tenemos un altavoz izquierdo en el que se puede aumentar y disminuir el nivel sonoro y un altavoz derecho al que se le puede retardar la señal. Ocurrirá que:

- Si no se atenúa ni se añade retardo: suceso auditivo en el medio.
- Si atenúo canal izquierdo: suceso auditivo hacia la derecha.
- Si no atenúo pero retardo la señal: suceso auditivo hacia la izquierda.

Si atendemos a la zona de integración de Hass, anteriormente explicada en la teoría psicoacústica, entonces:

- Si la señal retardada, lo está un tiempo menor a 30 ms y la diferencia de niveles es menor a 10 dB el suceso está dentro de la zona de integración y lo situaremos en la izquierda.
- Si el retardo se sitúa entre 10 y 30 ms y la diferencia de niveles es mayor de 10 dB el suceso estará fuera de la zona de integración y lo situaremos a la derecha.

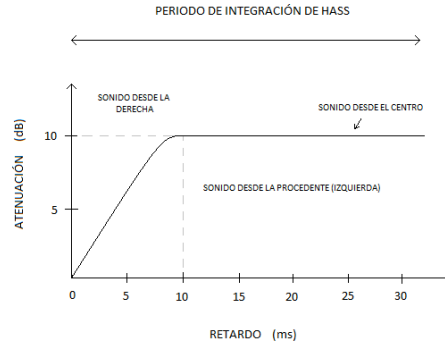


Fig. 5.1.: Zona de integración de Hass

Atendiendo a la figura anterior, nos interesa que el sonido proceda de la pantalla, por tanto, para que esto ocurra deberemos introducirle un retardo al altavoz más cercano a la audiencia, el valor del retardo debe estar dentro del periodo de integración de Hass:

$$\tau = \frac{r_1 - r_2}{c} + 10dB \quad (\text{Ec. 5.1.})$$

$$\tau = \frac{r_1 - r_2}{c} + 30dB \quad (\text{Ec. 5.2.})$$

Por tanto, deberá situarse entre los dos valores anteriores.

5.1.2. REALIMENTACIÓN ACÚSTICA

Este efecto sólo se podrá producir cuando la sala de cine se utilice para conferencias o conciertos y no en la proyección de películas (ausencia de micrófonos), por tanto, lo desarrollaremos de manera breve.

Tomando la condición $SNR \geq 25dB$ como cierta siempre, el nivel máximo dependerá:

- Si no hay micrófonos: del umbral de molestia de la audiencia.

- Si hay micrófonos: de un suceso que marca el nivel máximo llamado realimentación acústica.

Cuando la señal acústica es captada, amplificada y emitida repetidamente, en múltiples ciclos, esto puede producir efectos no deseados. Puede ocurrir que para alguna frecuencia se produzca un bucle infinito (de captación-emisión) que provoca el acople (emisión de un tono de un nivel y frecuencia muy altos). Si las tensiones generadas por el micrófono y el altavoz son las mismas, ocurrirá este fenómeno.

Se deberá obtener, por tanto, el máximo nivel sin llegar a producir oscilación.

Para evitarlo se puede:

- Atenuar la señal entre micrófono y altavoz, aumentando la distancia entre ellos.
- Modificar directividades de micrófono y altavoz, para no recoger la señal emitida y así evitar el bucle infinito.

Hay en determinados casos que por la geometría de la sala o por los materiales de recubrimiento pueden aparecer oscilaciones a frecuencias determinadas. En este caso se remediará ecualizando la señal, para obtener una respuesta en frecuencia deseada, y en caso extremo, se filtrarán aquellas frecuencias de oscilación mediante filtros notch o ranura (un filtro muy selectivo que permite eliminar una sola frecuencia sin alterar la percepción subjetiva del oyente).

5.2. MÉTODOS DE RECUBRIMIENTO

En la sonorización de un recinto se persigue la uniformidad del sonido en todo el área de audiencia, para que éste no dependa del lugar ocupado.

Deberemos tener en cuenta por tanto el sonido directo, debido a que el reverberante tiende a distribuirse de forma uniforme por toda la sala. Además esta última empeora la inteligibilidad, por lo que no se debería tener en cuenta para una mejora de la sonorización.

Existen varios métodos de recubrimiento para alcanzar la uniformidad, nosotros hablaremos del sistema surround que es el que se utiliza en una sala de cine.

5.2.1. SISTEMA SURROUND

Es importante conocer lo que es un sistema surround debido a que es utilizado en las salas de cine (la sala 25 del Kinépolis lo incluye). En este apartado explicaremos cómo funciona de forma genérica y en el apartado 7 nos centraremos en el específico de la sala 25.

Un sistema surround se refiere al uso de múltiples canales de audio para provocar efectos envolventes a la audiencia, en este caso viendo una película. De esta forma, el espectador experimentará una experiencia como si viviese en primera persona la acción que observa en la pantalla.

Antiguamente la banda sonora de una película se reproducía a través de un solo altavoz, sonido monoaural (mono), o a través de dos, izquierdo y derecho, sonido estereofónico (stereo). En la actualidad cuando te sientas en una sala de cine, el sonido viene de todas las direcciones, que es lo que se conoce como sonido envolvente (surround).

El término surround es el común, llamándose técnicamente 'Multi-Channel Stereophonic' (estereofónico multicanal).

5.2.1.1. Configuración de canales

Existen varias configuraciones posibles:

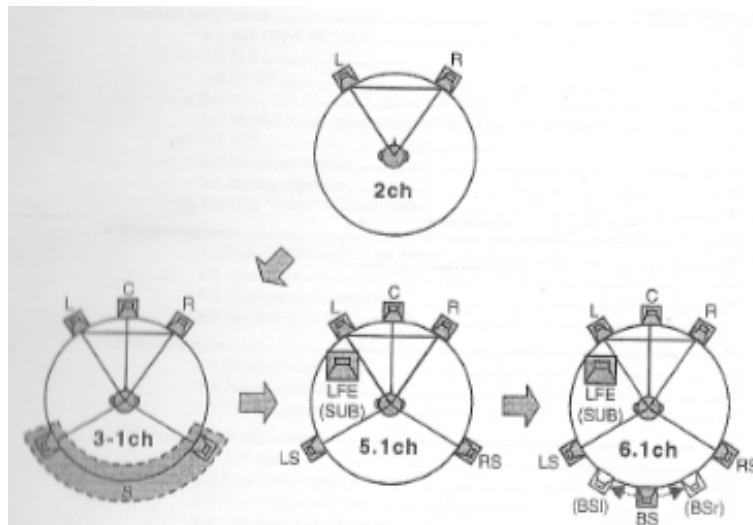


Fig. 5.2.: Configuraciones surround

- 3-1

Este método está basado en un sistema de dos canales (L,R) añadiendo un canal central (C) y un canal surround (S). Éste último será monoaural y estará situado por detrás del espectador.

Se llama 3-1 debido a que el '3' indica L,C y R y el '-1' indica el S. También puede llamarse 3.1, en este caso significa que los canales serán L, C, R y LFE (Low Frequency Effect).

- 5.1

Este método está basado en el sistema 3-1 pero haciendo que el canal surround sea estéreo (LS, RS) y añade un canal LFE para los graves.

- 6.1

Este método está basado en el sistema 5.1 pero añade un nuevo canal surround trasero (BS). La señal del canal BS puede dividirse en dos altavoces o bloques de altavoces (BSL, BSR) pero la señal será monoaural.

- 7.1

Este sistema está basado en el 6.1 añadiendo una señal estéreo para el BS, dividiéndola en BSL y BSR de forma real. También se puede añadir dos altavoces intermedios entre L y C, y entre C y R, teniendo LC y RC.

Este sistema es el que se utiliza en las grandes salas de cine debido a la cantidad de altavoces utilizados. Es el sistema envolvente más completo y el utilizado en la sala 25 de los cines Kinépolis.

5.2.1.2. Posicionamiento de canales

- L,R

Consideramos dos ángulos de separación para los altavoces L y R: 60° y 45°.

Si buscamos compatibilizarlo con sistemas convencionales de dos

canales usados para música será preferible utilizar los 60° de separación. Si buscamos su utilización para post-producción de TV o cine utilizaremos los 45° de separación.

Estos dos altavoces tendrán el mismo nivel de presión sonora (SPL) entre ellos, así como el mismo que el C.

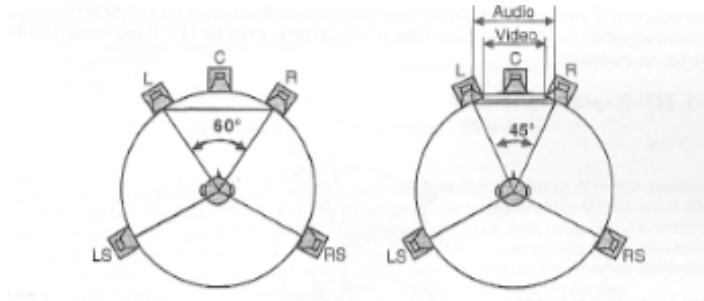


Fig. 5.3.: Ángulos de separación de los altavoces L y R en un sistema 5.1

- LS, LR

Para los altavoces surround hay dos tipos de ambientes: 'direct surround' o 'diffuse surround'. Es decir, directo o difuso.

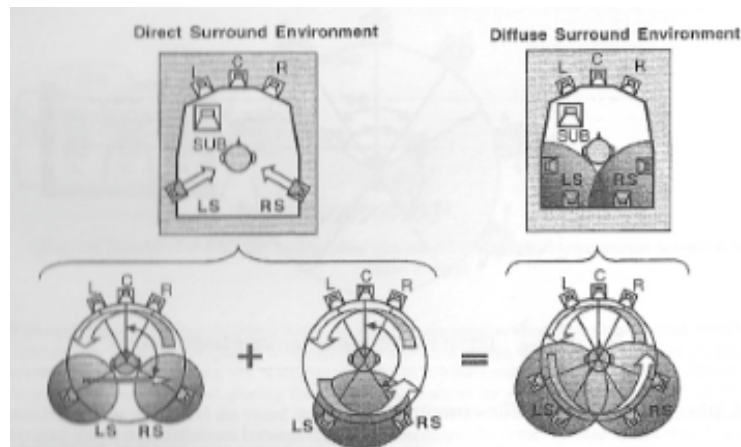


Fig. 5.4.: Ambientes 'direct surround' y 'diffuse surround'

Direct surround es un método en el cual el par de altavoces surround está apuntando directamente al punto de escucha (espectador). Las configuraciones habituales son a 110°, 135° o 150° desde el altavoz central (C).

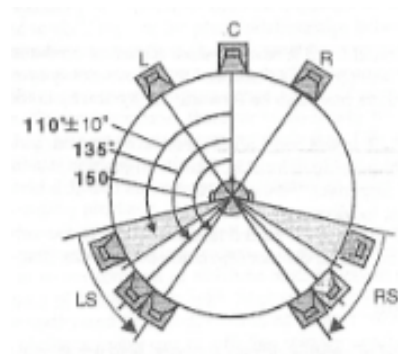


Fig. 5.5.: Configuraciones habituales en ‘direct surround’ de los altavoces LS y RS

Diffuse surround, de otra forma, no tiene un punto concreto de localización de la fuente para los altavoces. Es un método de expansión del área de escucha. Es el utilizado en cines. Las configuraciones habituales son en un rango de 60° a 150° desde el altavoz central (C).

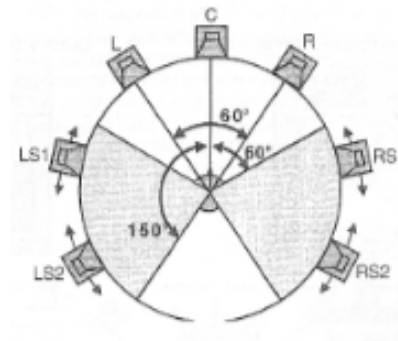


Fig. 5.6.: Configuraciones habituales en ‘diffuse surround’ de los altavoces LS y RS

Los bloques de altavoces surround, ya sean laterales o traseros tienen un nivel de presión sonora (SPL) de -3 dB respecto a L, C y R.

- C

En el caso de que no sea necesario relacionar el sonido con una imagen visual, el altavoz C se situará a la misma altura que L y R. Si es necesario relacionar el sonido con la imagen visual (el caso del cine), el altavoz C se situará un poco por encima que L y R. Esto es debido a que las bocas de

los personajes que aparecen en la pantalla (en el caso del cine), están situadas por encima de la mitad de la misma, por tanto al situar C por encima de la mitad estaremos favoreciendo la fusión del diálogo y la imagen.

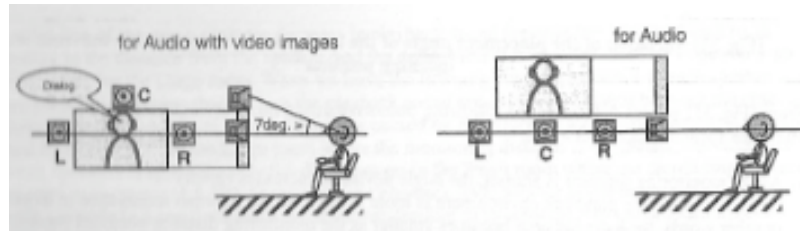


Fig. 5.7.: Configuraciones del altavoz C

El altavoz central tendrá el mismo nivel de presión sonora (SPL) que L y R.

- Subwoofer

Es necesario tener un altavoz de frecuencias bajas. La posición del subwoofer es importante, debido a que según donde lo situemos tendremos una mejor o peor respuesta.

Si lo ponemos en una esquina, tendremos buenos resultados en términos de potencia, pero tendrá algunos problemas en la respuesta en frecuencia.

Por tanto tendremos que tener especial cuidado para alcanzar el punto óptimo de potencia y respuesta en frecuencia, ya que si mejoras una, empeoras la otra.

El LFE tiene que tener un nivel de presión sonora de +10 dB respecto a L, C y R.

5.2.1.3. THX Certified Studios

Es un certificado para salas que contienen sistemas multicanal. Obtener este certificado conlleva cumplir unos requisitos mínimos de calidad. THX Certified Studio permite diseñar sistemas multicanal de acuerdo a los siguientes puntos:

- Cumplir con los estándares acordados para recintos en cuanto a sus

parámetros acústicos: tiempo de reverberación, inteligibilidad...

- Considerar el posicionamiento ideal de los altavoces de acuerdo con el propósito de la sala.
- Ajustes de monitorización y medidas de certificación por un ingeniero especializado THX.
- Se deben satisfacer los valores de referencias certificados por THX respecto a la acústica de la sala y la respuesta de monitorización.
- Se debe renovar la certificación anualmente cumpliendo con la regulación de mantenimiento.

Es importante que cualquier sala de cine tenga este certificado, puesto que es una garantía de calidad. La sala 25 tiene el certificado THX.

5.3. EQUIPAMIENTO

5.3.1. EQUIPAMIENTO NECESARIO POR LA FUNCIONALIDAD DE LA SALA

La sala 25 de Kinopolis es utilizada, además de para la proyección de películas, para distintos eventos como coloquios, clases maestras, presentación de productos o conciertos acústicos, por tanto veremos el equipamiento básico necesario para cada una de estas funcionalidades.

5.3.1.1. Sesiones cinematográficas

- Altavoces

Son necesarios únicamente los que distribuyen el sonido entre los espectadores, y que se encuentran ya posicionados en las propias paredes de la sala. Hablaremos de los altavoces de la sala 25 de manera más específica en el apartado 7.

- Sistema de proyección

Se necesitará tanto el proyector como la pantalla.

Todo esto está implantado en la sala de forma permanente.

El resto de equipo de sonido que disfruta la sala 25 es el siguiente:

- Amplificadores de potencia (18 Amplificadores BGW)
- Procesador de audio Dolby (CP650 Digital Dolby Cinema Processor)
- Procesador de audio DTS (DTS-6 Playback System)
- Procesador de audio SDDS (DFP-3000 SDDS Cinema Processor System)
- Adaptador Digital Dolby (DMA8 Plus Dolby)
- Filtro de cruce (THX D1138)

5.3.1.2. Coloquios

- Micrófonos

Se utilizarán de mesa o pie normalmente, aunque dependiendo de la movilidad que necesite el conferenciante se podrán incluir también los de solapa.

- Altavoces

Con los de distribución al público debería ser suficiente, pero en caso de necesidad se podrán acoplar altavoces de monitorado.

5.3.1.3. Conciertos

- Micrófonos

Se utilizarán micrófonos de pie.

- Altavoces

Serán necesarios altavoces de monitorado para que los músicos escuchen una referencia. También se podrán poner altavoces de cara al público desde el propio escenario para aumentar la sensación de que sonido e imagen visual coinciden.

- Unidad de efectos

Por lo general los propios músicos traerán sus unidades de efectos. Se utilizan para crear efectos tales como distorsión, reverberación...

5.4. SISTEMA DE CONEXIONADO

Analizaremos el esquema básico de conexión de los diferentes elementos del sistema de refuerzo sonoro en función de cada uno de los usos de la sala.

5.4.1. SESIONES DE CINE

Las señales de entrada serán el audio y vídeo previamente grabados que se distribuirán por separado. El vídeo se encaminará al proyector y el audio a los altavoces, que dependiendo de la sala estarán funcionando en estéreo o en señal envolvente (7.1 en el caso de la sala 25).

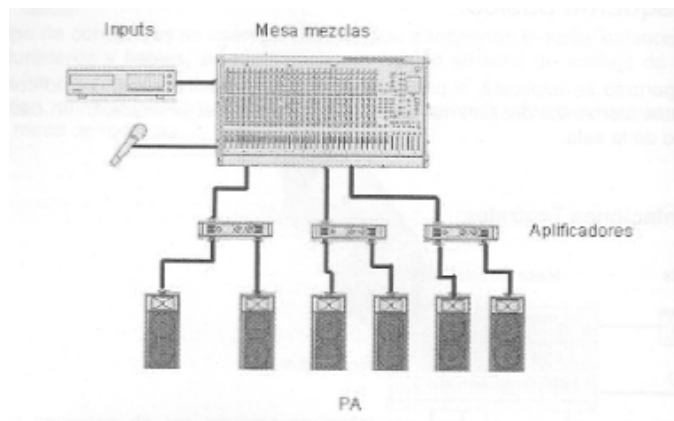


Fig. 5.8.: Sistema de conexionado para sesiones de cine

5.4.2. COLOQUIOS

La señal es producida por el conferenciante, será captada por los micrófonos y enviada a la mesa para ser así distribuida hasta los altavoces de 'public address'.

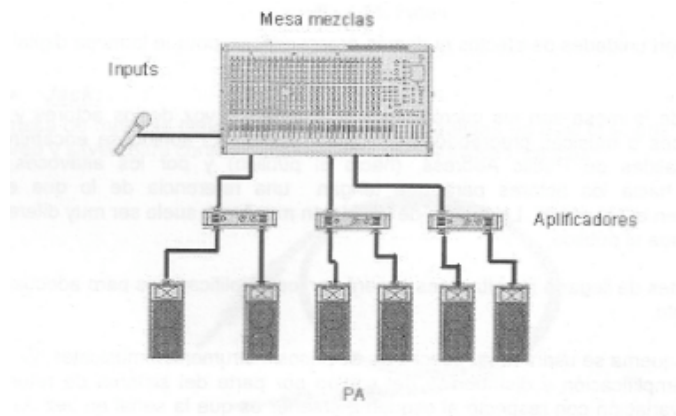


Fig. 5.9.: Sistema de conexionado para coloquios

5.4.3. CONCIERTOS

La mesa incluye unidades de efectos, pero aún así se podrían conectar unidades externas a la mesa, aunque no esté dibujado en la figura de debajo.

Por las entradas mandaremos la voz y la música procedente de los instrumentos, el sonido podrá ser mezclado y tratado en la mesa y después encaminado hacia los altavoces, tanto los de 'public address' como los de monitorado (de referencia). La mezcla de lo que sale por los monitores y lo que sale por los altavoces de PA serán muy diferentes.

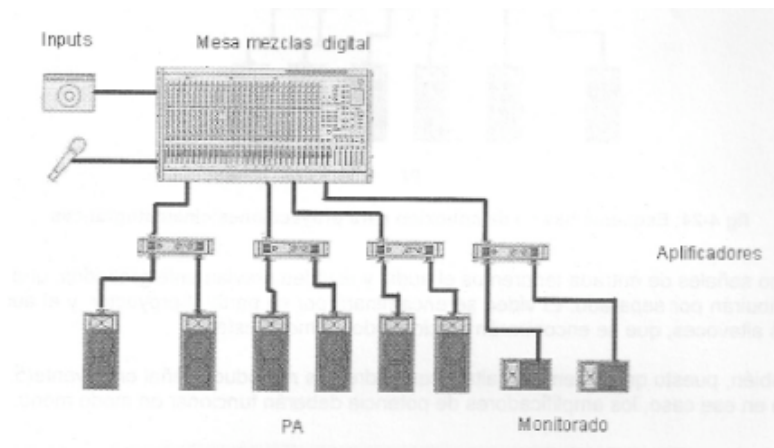


Fig. 5.10.: Sistema de conexionado para conciertos

6. ACONDICIONAMIENTO ACÚSTICO

El acondicionamiento acústico es algo primordial en el diseño de salas. Éste engloba todas las técnicas destinadas a corregir y adecuar el campo sonoro en el interior de una sala, logrando así los objetivos acústicos deseados.

Es necesario conocer el comportamiento sonoro de una sala para poderlo acondicionar acústicamente. De esta forma, se recurre a programas de simulación, como EASE, que nos permiten un análisis del campo sonoro dentro de la sala, proporcionando parámetros acústicos y auralizaciones.

Existen dos tipos:

- Acondicionamiento primario:

Se aplica durante la fase de diseño, previo a la construcción de la sala. Con los programas de simulación es posible el análisis de la repercusión de utilizar distintos materiales, su colocación, la geometría o el volumen de la sala para adaptarla a los requisitos acústicos óptimos.

- Acondicionamiento secundario:

Se aplica una vez haya sido construida la sala. Se utiliza para corregir deficiencias de la misma mediante la aplicación de materiales acondicionadores tales como: absorbentes, difusores, reflectores o resonadores.

Proporciona resultados más óptimos el acondicionamiento primario que el secundario. En el caso de la sala 25 se combinan los dos, debido a que después de la construcción de la misma se encontró el defecto de los ecos, y se tuvo que poner un material difusor en el tercio trasero del techo.

6.1. GEOMETRÍA DE LA SALA

Un diseño correcto de la geometría de la sala supone un hecho esencial para un buen acondicionamiento acústico de la sala. Por tanto, la inclinación del techo, la forma de la sala, la disposición de los oyentes o el volumen de la misma son determinantes para conseguir una buena acústica.

La elección de la forma de la sala, deberá tener en cuenta que todos los oyentes disfruten de una buena inteligibilidad de la palabra, que no haya ecos, focalizaciones, sombras sonoras u otras anomalías acústicas.

La mejora de la inteligibilidad de la palabra se obtiene aumentando el número de primera reflexiones en aquellos lugares donde el sonido directo llega con más debilidad. Éstas pueden llegar del techo o de las paredes laterales. Si la sala es estrecha se conseguirá llegar a los lugares centrales con mayor facilidad (no es el caso de la sala 25), si no estos puntos deberán ser reforzados de otra forma. La otra fuente de reflexiones es el techo, cuyo efecto depende de su inclinación.

Podemos comparar tres tipos de inclinación del techo (el de la sala 25 es del tipo 'c') para ver cómo funcionan las reflexiones respecto de cada uno:

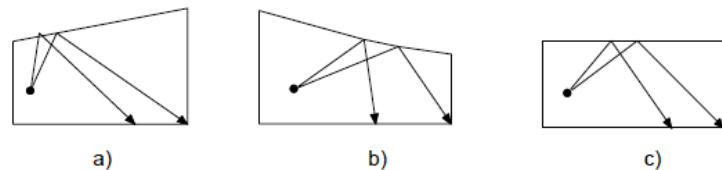


Fig. 6.1.: Tipos de inclinación del techo

Como muestra se observan dos rayos que alcanzan la zona más alejada de la fuente.

Los rayos de menor longitud (menor retardo) son los del tipo de la sala b, y los de mayor longitud (mayor retardo) los del tipo de la sala a. El tipo de techo de la sala 25 se encuentra entre los dos anteriores. Como las reflexiones útiles (integradas con el sonido directo) son las recibidas dentro de los primeros 50 ms, será bueno que se produzca el menor retardo posible.

Además, la inclinación del techo de tipo 'b' tendrá otra ventaja debido a la proximidad del techo con el suelo en la parte posterior, el nivel de las primeras reflexiones será alto, aumentando tanto la inteligibilidad de la palabra como la claridad de la voz.

También se pueden analizar los efectos de la inclinación del suelo. Con ésta,

además de buscar tener una mejor visibilidad desde cualquier posición (éste es el motivo principal por el que se adopta esta forma en una sala de cine), se busca alcanzar niveles sonoros aceptables y, por tanto, buena inteligibilidad incluso en las últimas filas.

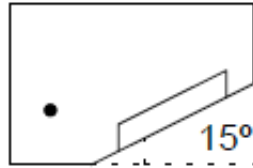


Fig. 6.2.: Grado mínimo recomendado de inclinación del suelo

La inclinación del plano donde se sitúan los oyentes, permite evitar el efecto seat-dip (atenuación del sonido directo, sobre todo en las frecuencias bajas y medias), que se origina cuando la incidencia es rasante (ángulos de incidencia pequeños). El mínimo ángulo de inclinación recomendado para el suelo es de 15° y el máximo de 35° por razones de seguridad.

Además, hay que tener en cuenta el volumen de la sala, que es otro factor determinante. Está íntimamente relacionado con el tiempo de reverberación de la sala.

Para una sala de cine el valor recomendado de tiempo de reverberación se sitúa entre 0.9 y 1.2 segundos. Pero dependiendo del volumen del recinto, necesitaremos un acondicionamiento acústico más o menos riguroso para alcanzar dichos valores. De esta forma, según aumenta el volumen de la sala, también habrá que aumentar la superficie del material absorbente para que el tiempo de reverberación no aumente proporcionalmente. Como veremos en el apartado 7, este punto está muy bien conseguido en la sala 25.

6.2. MATERIALES DE ACONDICIONAMIENTO

Como ya hemos mencionado antes, existen distintos materiales acondicionadores, entre ellos están los absorbentes, resonadores, difusores y reflectores.

En la sala 25 vamos a encontrar dos de estos tipos: absorbentes y difusores. Éstos son los que trataremos de forma genérica a continuación.

6.2.1. MATERIALES ABSORBENTES

Se denominan materiales absorbentes a aquellos destinados específicamente como revestimiento del interior de un recinto (pese a que todos los materiales tienen asociada una determinada capacidad de absorción), para aumentar la absorción del sonido con los siguientes objetivos:

- Reducir el nivel del campo reverberante, en ambientes muy ruidosos.
- Optimizar el tiempo de reverberación en función de la aplicación que se le dé al recinto.
- Eliminar o prevenir la aparición de ecos.

Estos materiales por regla general, son porosos de estructura fibrosa o granular, constituidos básicamente de lana de vidrio, lana mineral, espuma a base de resina de melamina o espuma de poliuretano. Además al absorber la energía sonora incidente, mejoran los resultados de los materiales propiamente aislantes.

El mecanismo de absorción es el siguiente:

Cuando la onda sonora incide sobre estos materiales, parte de la energía es reflejada y el resto penetra en su interior a través de sus poros. Una vez dentro, la presión sonora pone en movimiento las partículas de aire que se encuentran en los espacios huecos del material. Este flujo de aire interno es el responsable de la disipación de la energía sonora en forma de calor, debido al rozamiento con las capas sólidas del material.

Cuanto mayor sea el número de veces que se hace pasar a la onda a través de estos materiales, mayor será la atenuación. Por eso, se suelen disponer en las paredes limítrofes del recinto, así, la porción de energía que atraviesa de forma completa el material, es reflejada por la pared interior hacia el mismo, siendo nuevamente absorbida.

La capacidad de absorción de los materiales porosos se mide por medio del denominado coeficiente de absorción, α , que mide la relación entre la energía absorbida y la incidente. El fabricante los suele proporcionar para las seis bandas de octavas: 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000 Hz. Por tanto, este coeficiente depende de la frecuencia, soliendo aumentar con la misma.

Las características de absorción no solo dependen del valor del coeficiente de absorción, hay otros factores también determinantes, como:

6.2.1.1. Absorción según el espesor del material

Según aumentamos el espesor del material, la absorción aumenta, puesto que la onda sonora permanecerá más tiempo dentro del material, siendo así mayor la disipación de energía. Aunque se nos presenta una condición, esto ocurre para aquellas frecuencias que no cumplen lo siguiente:

$$D \ll \lambda$$

Siendo D el espesor del material.

Esto es debido a que estos materiales absorbentes se colocan pegados a una pared rígida, de modo que la velocidad de las partículas de aire próximas a la pared es prácticamente nula, aumentando la misma según nos vamos separando de la pared.

El siguiente nulo de velocidad aparece a una distancia de $\lambda/2$ y el máximo a $\lambda/4$. Siendo así la separación entre máximos y mínimos sucesivos de $\lambda/2$.

Esto conlleva que cuando el espesor es un múltiplo impar de $\lambda/4$, se produce en el interior del material absorbente, uno o más máximos de la velocidad de las partículas del aire y, como consecuencia directa, la absorción es mayor para esas frecuencias.

Debido a que la frecuencia es inversamente proporcional a la longitud de onda, cuanto menos sea la frecuencia, mayor será el espesor necesario para que se cumpla la condición de máxima absorción. Por tanto, si queremos conseguir una absorción máxima para un amplio rango de frecuencias, tendremos que elegir un espesor tal que la frecuencia mínima cumpla:

$$D = k \cdot \frac{\lambda}{4} = k \cdot \frac{c}{4f} \quad / k = 1, 3, 5 \dots$$

(Ec. 6.1.)

6.2.1.2. Absorción según la porosidad del material

Un aumento en la porosidad del material conlleva una mayor absorción, ya que la porción de energía sonora que penetra en el material es mayor.

Este efecto se produce para todas las frecuencias.

6.2.1.3. Absorción según la densidad del material:

Un aumento de la densidad del material absorbente produce una mayor capacidad de absorción. Pero existe un valor máximo, a partir del cual la absorción empieza a disminuir. Éste se encuentra entre 40 y 70 kg/m^3 , no siendo aconsejable superar los 100 kg/m^3 .

Esto se debe a que la disipación de energía sonora en forma de calor se produce cuando el flujo de aire interno choca con las capas sólidas del material. Por tanto, al aumentar la densidad, aumentamos la presencia de estas capas y por tanto, el rozamiento es mayor, siendo a su vez, mayor la absorción. Sin embargo, si el número de capas se hace excesivamente grande, disminuye la porosidad del material y la energía incidente será reflejada en su mayoría. Por eso la absorción vuelve a disminuir.

6.2.1.4. Absorción con paneles suspendidos del techo:

Hasta ahora hemos analizado el comportamiento de materiales absorbentes colocados paralelamente a la pared. Sin embargo, a veces se dispone de poca superficie tratable respecto al grado de absorción que se necesita conseguir. En estos casos, se recurre a colgar del techo paneles de material absorbente. Se aplican, generalmente, en recintos de dimensiones grandes o medias y de ambiente ruidoso: fábricas, comedores, polideportivos, etc. Ésta fue una de las medidas que se estudiaron en la sala 25 a la hora de solucionar el problema de ecos, pero finalmente se optó por utilizar un material difusor debido a que era menos costoso en cuanto a obra, ya que para instalar las pantallas absorbentes en el techo había que colocar unas vías metálicas.

Los materiales absorbentes se pueden cubrir con materiales específicos con las siguientes finalidades: para protegerlos de posibles daños externos, para que no suelten sustancias perjudiciales para la salud o por estética. Pero siempre debe dejarse la superficie porosa accesible desde el exterior, para no perder así su capacidad de absorción.

6.2.1.5. Absorción de las butacas:

Es especialmente importante en una sala de cine el comportamiento acústico de las butacas. Deberán tener un coeficiente de absorción parecido al del cuerpo humano.

6.2.2. DIFUSORES:

Son aquellos elementos que reflejan el sonido uniformemente en todas las direcciones. Se utilizan para mejorar la difusión del sonido en cualquier tipo de sala, eliminando así anomalías acústicas (ecos, coloraciones, focalizaciones, etc.).

En la sala 25, frente al problema de ecos surgido, se adoptó la implantación de este tipo de material como solución. Por tanto, se procedió a cambiar el tercio trasero de los paneles del techo por otros que produjesen una reflexión difusa del sonido (presentando un relieve en forma curva con una profundidad de 15 cm en la zona más prominente), dispersando en múltiples direcciones la onda incidente. Así se conseguía transformar una reflexión con mucha energía en varias con menor energía. Y además, la mayor parte de la superficie presentaría un ángulo más favorable para la absorción.

A los difusores se les da mucho uso, también, en salas de conciertos para conseguir elevar el grado de espacialidad del oído, mejorando la calidad acústica del recinto.

Funcionan como difusores del sonido:

- Superficies con adornos, relieves, irregularidades, huecos, rugosidades. Por ejemplo, techos artesonados (con paneles poligonales), estatuas, etc.
- Difusores policilíndricos: conjunto de superficies lisas y convexas cuyo radio de curvatura es menor de 5 m. La zona de cobertura es mucho mayor que la de los reflectores convexas y el nivel de las reflexiones menor, funcionando así como difusores.
- Difusores de Schoroeder: superficies con irregularidades creadas según la teoría de Schroeder. También llamados RPG (Reflection Phase Grating).

Todos ellos se comportan como difusores para un determinado rango de frecuencias, fijado por las dimensiones de las irregularidades. Para frecuencias bajas (longitud de onda alta), las reflexiones tienden a concentrarse en la dirección especular, porque para estas frecuencias las irregularidades son imperceptibles. Por tanto, las dimensiones de las irregularidades se deberán adecuar según la frecuencia límite a partir de la cual queramos aumentar la difusión sonora. Cuanto mayores sean, más baja será la frecuencia límite.

7. PROCESO DE CREACIÓN Y SIMULACIÓN DE LA SALA CON EASE

En este capítulo trataremos todo lo correspondiente al estudio de la sala 25 del Kinépolis de Madrid, conociendo las características de la sala, sus materiales y equipo. Por último crearemos la sala con el programa de simulación EASE y haremos un estudio detallado sobre los requisitos acústicos.

7.1. LA SALA

La sala está situada en Pozuelo de Alarcón (Madrid) y pertenece a la empresa de multicines Kinépolis. La sala elegida es la número 25, la última y más grande de todo el complejo. Es famosa por ser la sala de cine más grande de Europa.



Fig. 7.1.: Sala 25 del Kinépolis

Podemos encontrar sus características más básicas en la página web www.kinepolis.com/es:

SALA	AFORO	DISTANCIA DE PANTALLA-CABINA	DISTANCIA DE PANTALLA-PRIMERA FILA	TAMAÑO DE PANTALLA	ACCESO	TECNOLOGÍA
25	996 pers.	47.50 m	12,00 (AxA)	25,00 x 10,00 m		THX, Dolby®

Fig. 7.2.: Características de la sala 25

Las principales desventajas a la hora de cumplir unos requisitos mínimos de calidad las encontramos en su gran tamaño. Con una sala tan grande, tiene un aforo de casi mil personas, hay que tener especial atención a los tiempos de reverberación, teniendo que adaptar la sala, en cuanto a materiales y forma, de modo que podamos compensar los problemas que plantean su extensión.

Una vez construida la sala se detectó un problema de ecos en los asientos centrales, cuando el sonido reproducido eran diálogos provenientes del canal central. Había una reflexión en torno a los 270 milisegundos que superaba el umbral de nivel a partir del cual la reflexión se percibe como un eco molesto por el espectador (información proporcionada por Kinépolis).

Para este problema había que buscar una solución óptima teniendo en cuenta que la sala ya había sido construida.

Como actuar sobre la pantalla o cambiando el ángulo que forma el techo con el sonido eran muy costosas, la primera porque afectaría negativamente a la imagen y la segunda por temas de obra, se decidió actuar sobre los materiales del techo sin variar la estructura de la sala.

Por tanto se actuó sobre el techo, cambiando el material del tercio trasero por paneles o placas difusoras de sonido (tienen un relieve en forma curva que dispersan las reflexiones en diferentes direcciones). De esta forma se convierten en muchas reflexiones con poca energía lo que era una reflexión con mucha energía. Con esta medida se favorece además el ángulo del techo para la absorción.

Esta solución produce un efecto inapreciable en el tiempo de reverberación, puesto que la superficie tratada es muy pequeña en comparación con la superficie total de la sala. De modo que no perjudica a la re-certificación THX, es más, mejoran la calidad acústica percibida.

La principal ventaja a la hora de cumplir unos requisitos mínimos de calidad la encontramos en su forma, debido a que es una sala rectangular. De este modo la sala es acústicamente limpia, es decir, no se presentan más obstáculos a las ondas sonoras que las superficies que acotan el recinto. Y nos ayuda notablemente a la hora de elegir el grado de detalle en la simulación, puesto que no es necesario pensar en la longitud de los segmentos que supondría una superficie curva (el tercio trasero del techo se simula como un material difusor).

En los siguientes dibujos se puede observar que la sala tiene dos alturas con un suelo horizontal, la que está abajo del todo, donde la pantalla, y una intermedia, por donde se accede a la sala desde el exterior de la misma, a través de dos pasillos que están debajo de las propias butacas.

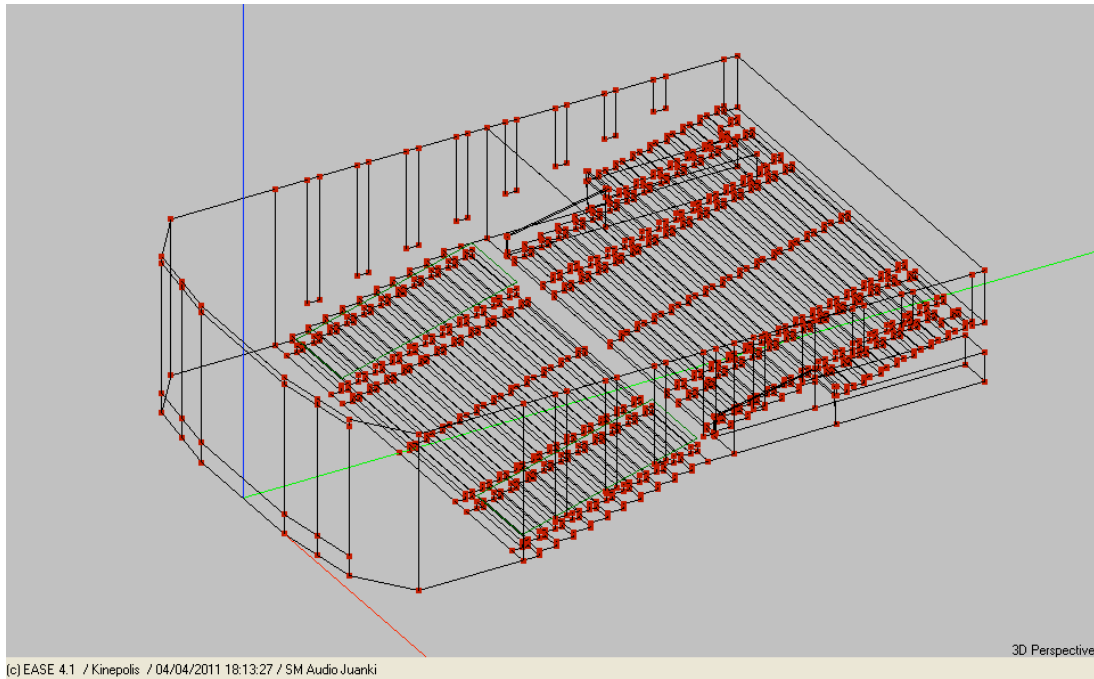


Fig. 7.3.: Simulación con EASE de la sala con vistas de vértices y caras

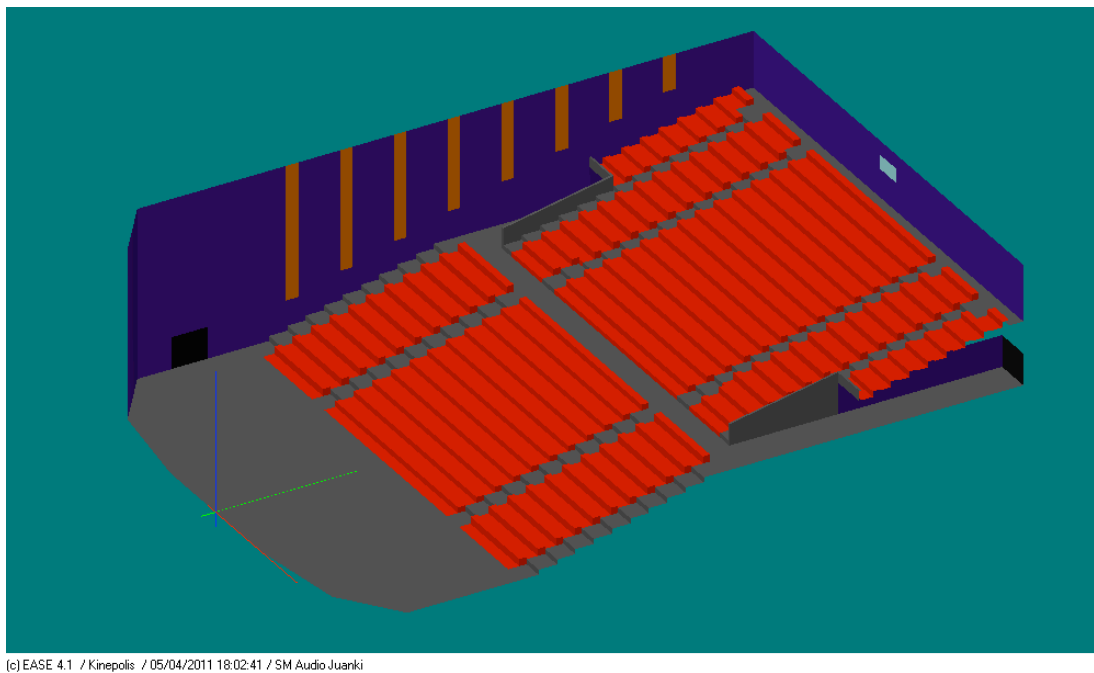


Fig. 7.4.: Simulación de la sala con vistas de cada material

7.2. DISEÑO

Por comodidad y eficacia, la simulación de la sala se ha llevado a cabo de forma secuencial y por partes, favoreciendo así que no se produzcan solapamientos de caras o queden agujeros en el recinto, debido a que esos problemas derivan en la imposibilidad de realizar la simulación. Por tanto empezamos creando la sala en su forma más básica hasta alcanzar la forma real, paso a paso, inquiriendo en los detalles según avanzamos en su creación.

El primer paso es crear una estructura básica de su forma (aunque no sea así realmente) para ir trabajando sobre ella de forma más sencilla. Así construimos una planta rectangular y dos alturas, desde donde partirán los dos bloques de butacas. En la primera altura está situada la pantalla y las puertas de acceso al exterior. En los laterales de la segunda altura se encuentran los dos pasillos que desembocan en las puertas de acceso a la sala.

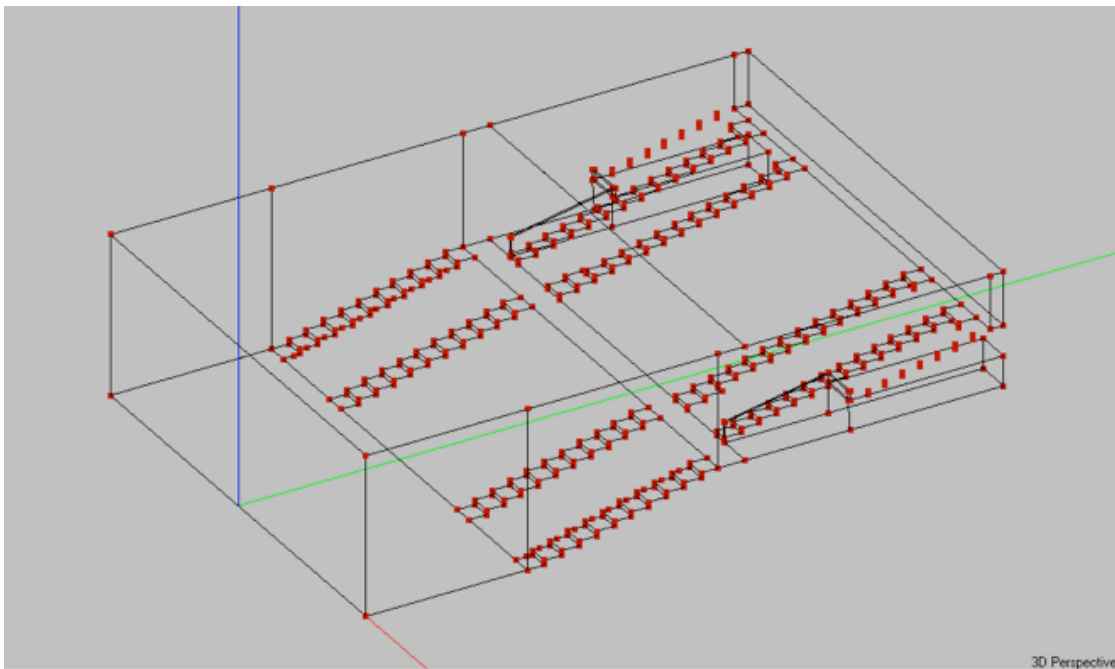


Fig. 7.5.: Sala de la forma más sencilla

Una vez creada la estructura principal empezamos a construir el bloque de asientos. Su diseño tiene unas características especiales debido a que hay que tener en cuenta que la función única de las butacas es contener un espectador, por tanto este bloque lo diseñamos conforme al volumen total que forman una butaca y un espectador de forma conjunta.

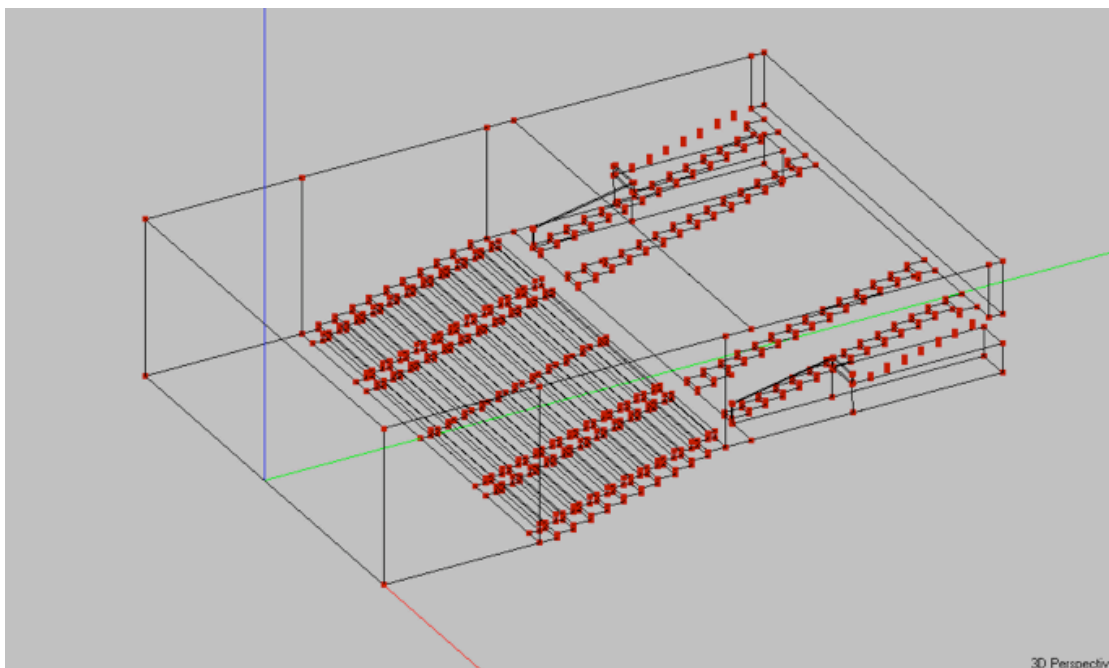


Fig. 7.6.: Sala aumentando el grado de detalle, butacas zona baja

También tenemos que tener en cuenta que al tratarse de una sala tan grande (996 butacas) en muchas ocasiones la mayoría de ellas se encontrarán vacías, sobre todo las situadas en los laterales de la sala. Con todo, hacemos un cálculo medio para esto de la siguiente forma:

- Cálculo de volúmenes:

- Volumen butacas:

Conocemos las medidas de las mismas:

Respaldo: 0.05 m^3

Asiento: 0.027 m^3

Posa-brazos: 0.0035 m^3 (Puesto que los comparten dos butacas contiguas, consideraremos uno por butaca)

Total butaca: 0.08 m^3

- Volumen personas:

Conociendo la densidad y masa media podemos hallar de forma sencilla el volumen:

Densidad media: 933 kg/m^3

Masa media: 65 kg (Hay que contar con que van hombres, mujeres y niños)

Volumen medio/persona: 0.07 m^3

Hacemos una aproximación teniendo en cuenta también que en algunas ocasiones habrá butacas vacías.

El volumen total entre butaca y persona será, por tanto, de 0.15 m^3 .

Los bloques de butacas se construirán por filas, que es la manera más cómoda. Por tanto, sabiendo el número de butacas que hay por filas, construiremos un bloque (hexaedro) de mayor o menor volumen en función de los asientos.

En la siguiente figura podemos observar las butacas que hay en la sala y su distribución:

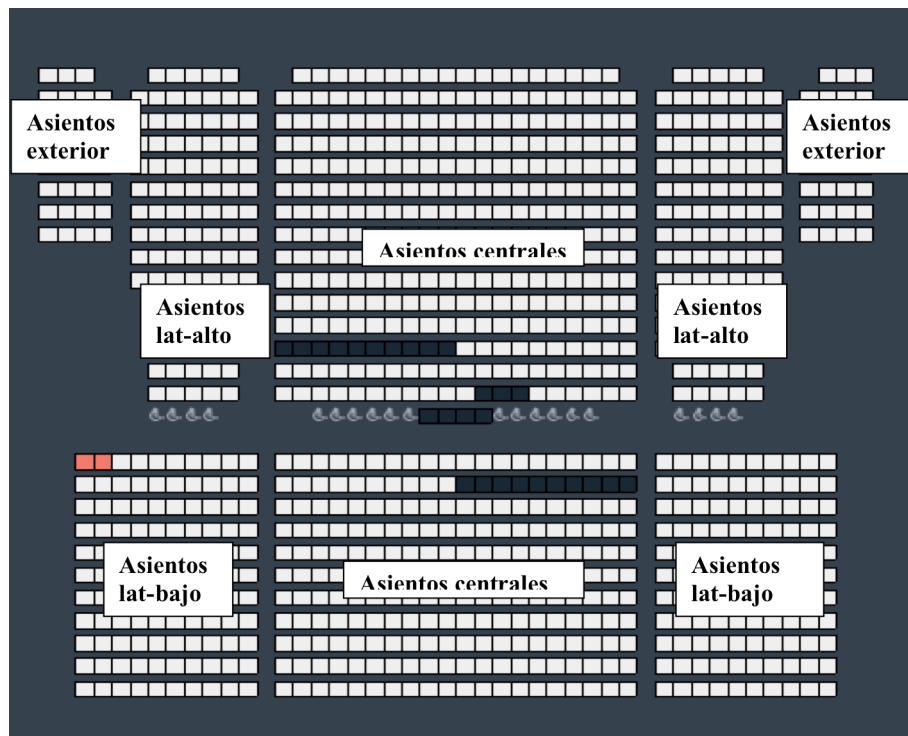


Fig. 7.7.: Disposición de los asientos

Teniendo en cuenta esto, los volúmenes por fila quedarán de la siguiente manera:

(Posición asientos): $(V) = (largo) \times (profundidad) \times (altura)$; (número asientos)

Asientos centrales: $3 \text{ m}^3 = 15\text{m} \times 0.5\text{m} \times 0.4\text{m}$; (20 asientos/fila)

Asientos lat-bajo: $1.5 \text{ m}^3 = 6\text{m} \times 0.5\text{m} \times 0.5\text{m}$; (10 asientos/fila)

Asientos lat-alto: $0.75 \text{ m}^3 = 3.25\text{m} \times 0.5\text{m} \times 0.46\text{m}$; (5 asientos/fila)

$1.05 \text{ m}^3 = 4.25\text{m} \times 0.5\text{m} \times 0.5\text{m}$; (7 asientos/fila)

Asientos exterior: $0.6 \text{ m}^3 = 2.75\text{m} \times 0.5\text{m} \times 0.44\text{m}$; (4 asientos/fila)

$0.35 \text{ m}^3 = 1.75\text{m} \times 0.5\text{m} \times 0.4\text{m}$; (3 asientos/fila)

Una vez conocidos estos datos procedemos a construir los bloques de butacas-persona de fila en fila, obteniendo como resultado la siguiente figura:

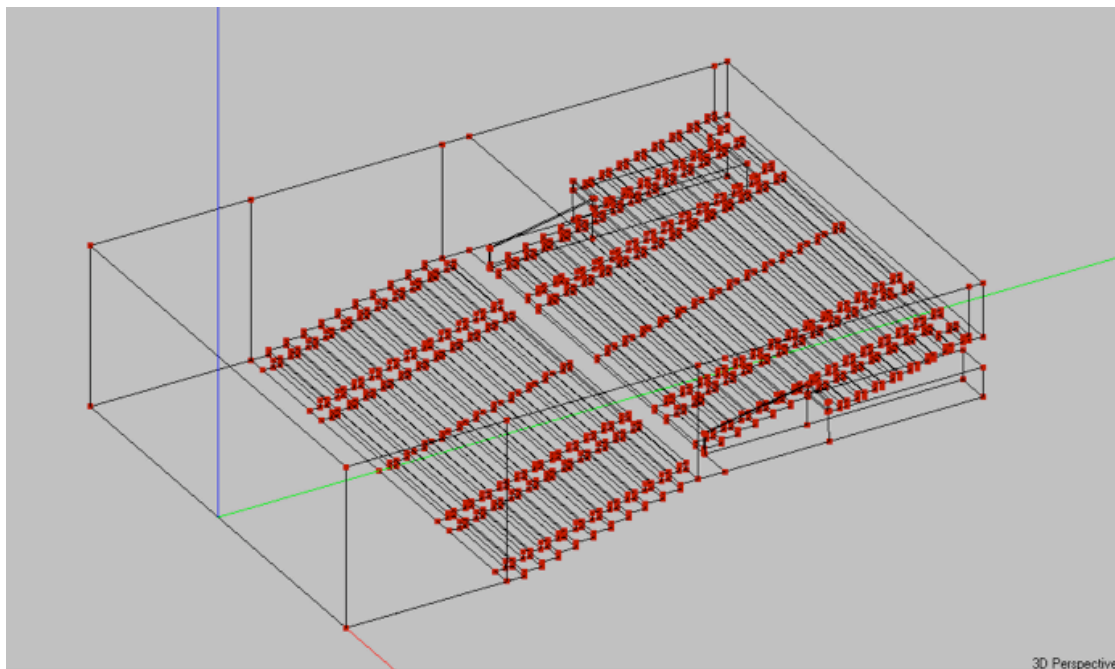


Fig. 7.8.: Sala aumentando el grado de detalle, todas las butacas

Una vez que tenemos el grueso de la sala ya construido, pasamos a los detalles. Creamos las cortinas que están colgadas en los laterales, creamos la ventana de proyección, las puertas y corregimos el fondo de la sala donde está situada la pantalla.

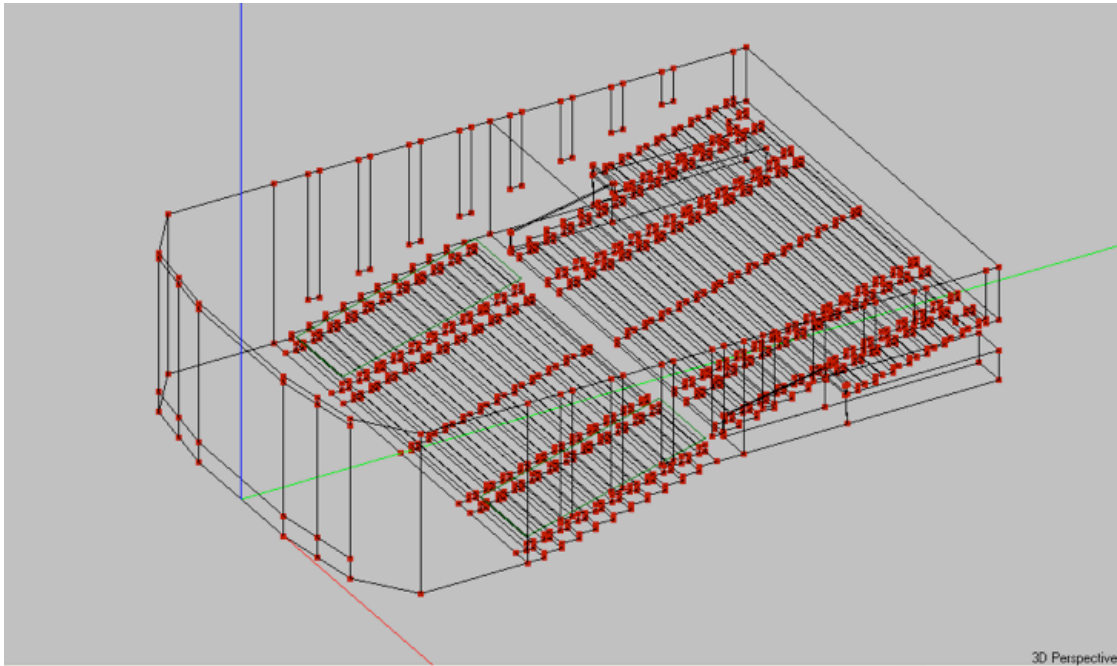


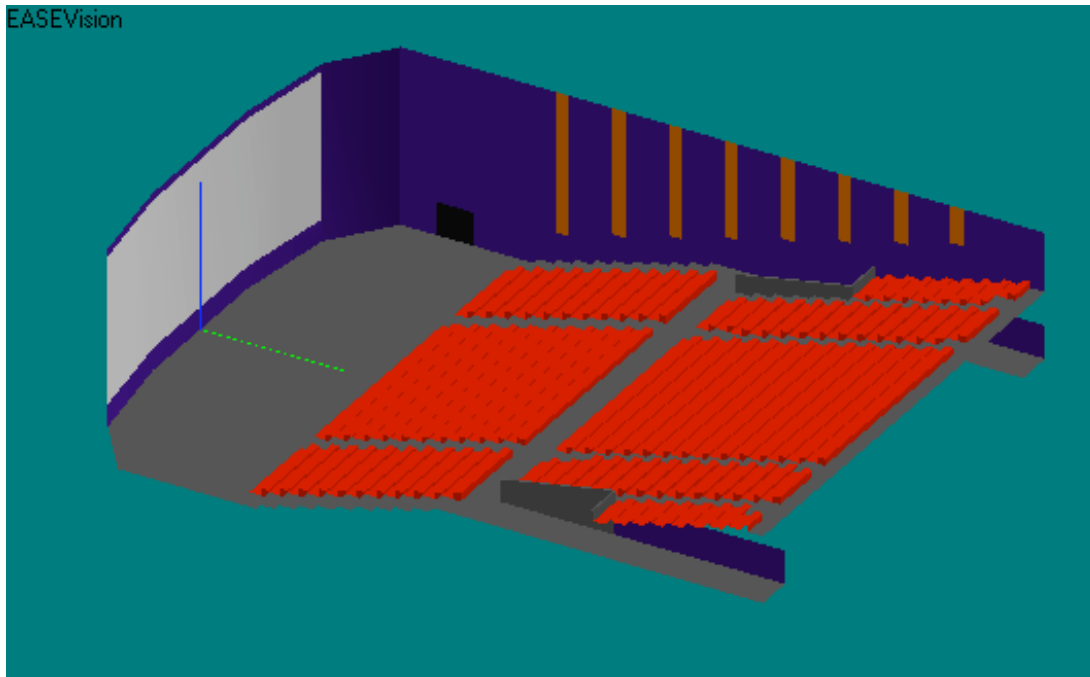
Fig. 7.9.: Sala con el mayor grado de detalle

Esta forma de creación de la sala es muy trabajosa, pero nos da la seguridad de la construcción correcta de la misma y nos ofrece resultados óptimos en función de datos reales (como las consideraciones de que no siempre se llena la sala, la diferencia de personas que pueden acudir en masa y altura, etc.).

Una vez hemos construido la sala se procede a introducir las características de los diferentes materiales, ya que acústicamente se comportan de forma diferente. Entre ellos los que suponen un conflicto mayor son las butacas, ya explicadas anteriormente, y el techo (comentado en el apartado 7.1.).

Finalmente se han creado 1350 vértices (675 con su imagen simétrica) y 918 caras (459 con su imagen simétrica). De éstas últimas podemos ver todas las características (coordenadas, tamaños, materiales, texturas...) a través del menú Edit Project -> View -> Tables.

La versión final de la sala es la siguiente:



(c) EASE 4.1 / Kinopolis / 26/05/2011 19:34:00 / SM Audio Juanki

Fig. 7.10.: Versión final de la sala

7.3. MATERIALES

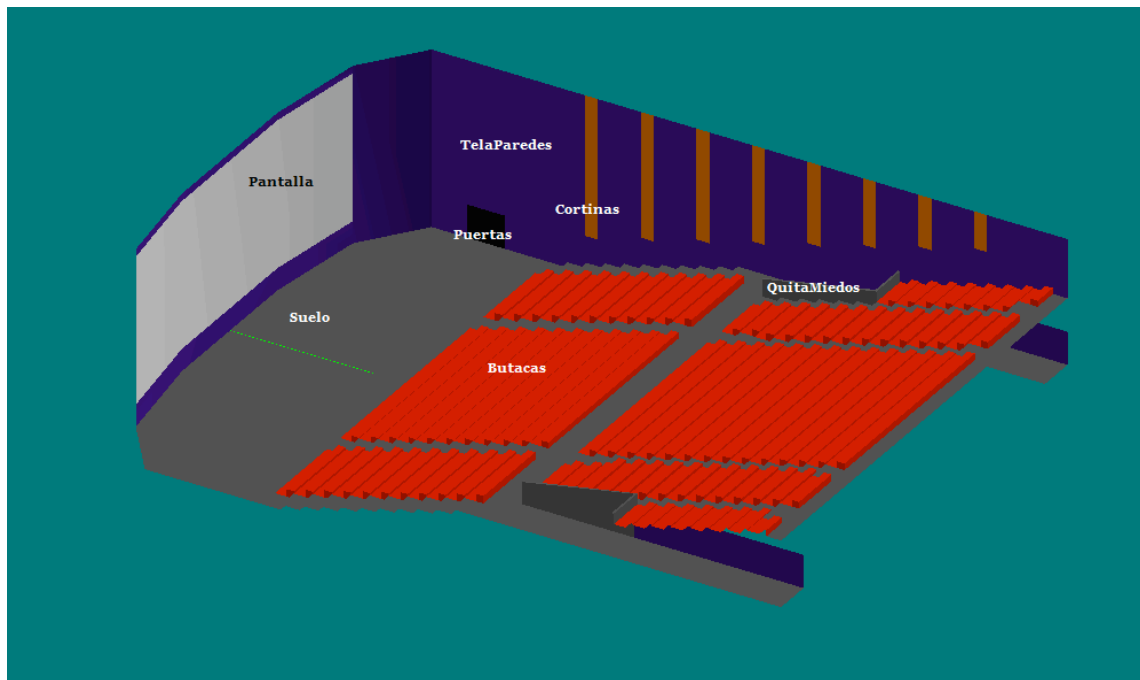
A la hora de introducir a cada material los coeficientes de absorción, texturas, etc. se puede hacer de dos formas. EASE nos proporciona una base de datos con materiales que podemos elegir y asignar a cualquiera de los nuestros, pero también nos permite editarlo desde cero a nuestro gusto. Esta segunda forma es más sencilla ya que no tenemos que buscar un material parecido y podemos meter directamente los valores concretos.

En nuestra sala nos encontramos con nueve materiales diferentes, todos ellos creados desde cero:

- Pantalla
- Suelo

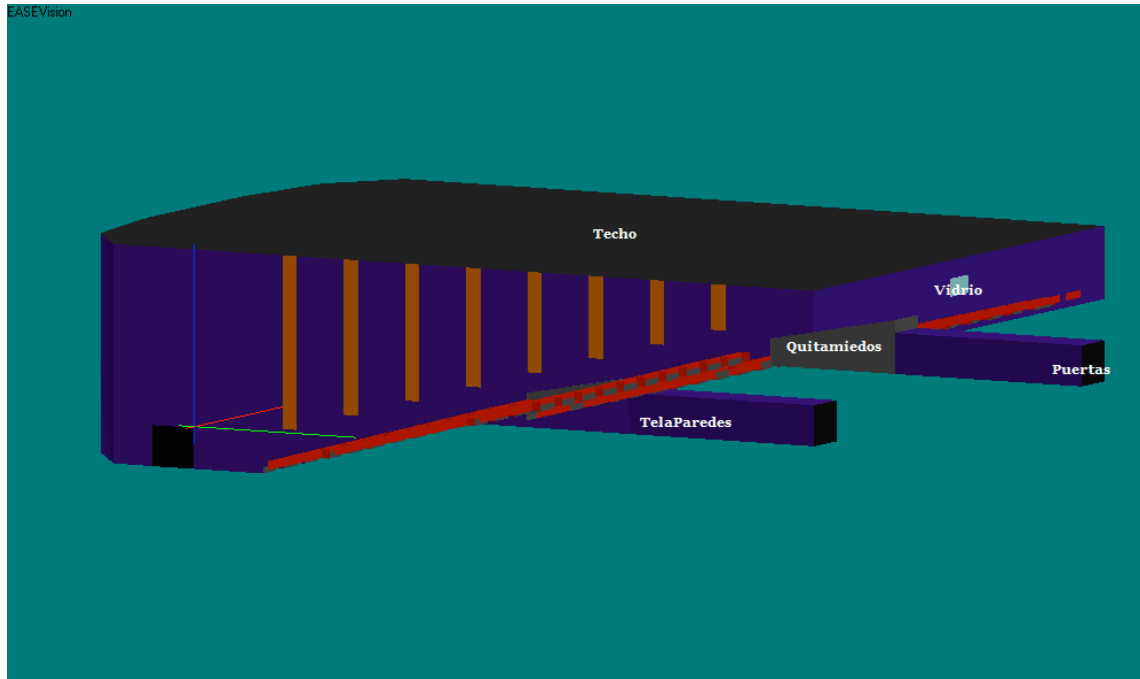
- TelaParedes
- Puertas
- Cortinas
- Butacas
- QuitaMiedos
- Vidrio
- Techo

En la siguiente figura se aprecia la distribución de estos materiales:



(c) EASE 4.1 / Kinepolis / 26/05/2011 17:01:39 / SM Audio Juanki

Fig. 7.11.: Disposición de los materiales en la sala



(c) EASE 4.1 / Kinépolis / 26/05/2011 19:49:00 / SM Audio Juanki

Fig. 7.12.: Disposición de los materiales en la sala

Un importante problema que hemos encontrado con Kinépolis, por ser una empresa privada, a la hora de obtener información acerca de la sala 25, ha sido con los coeficientes de absorción de los materiales de la sala. No nos han facilitado el acceso a los valores exactos, por más que lo hemos intentado, pero si nos han ofrecido el nombre del tipo de material de cada zona de la sala. De esta forma, aún sin ser fieles a la sala al cien por cien, hemos respetado de manera aceptable el diseño original de la misma, apoyándonos con información externa de los materiales provistos.

Hemos considerado que no tener esta información real no era motivo suficiente para no seguir con el proyecto, puesto que no sufría ninguna diferencia conceptual (y serviría de base para próximos estudios acústicos de cualquier otra sala de cine). Tan sólo deberemos tener en cuenta a partir de ahora, que no podemos ajustar el modelo, siendo así los resultados de los parámetros acústicos una aproximación.

A continuación se presenta cada material de forma individual con sus características propias. Además, debemos tener en cuenta que todos los materiales, excepto el tercio trasero del techo, se comportan acústicamente como absorbentes, por lo que les hemos introducido un scattering de 0.1 (comportamiento difusor prácticamente nulo). Como ya hemos comentado anteriormente, ese tercio trasero del techo se comporta como un difusor para evitar ecos en las butacas centrales, por ello le hemos puesto un valor de scattering de 0.4 (comportamiento difusor).

7.3.1. PANTALLA

La pantalla de proyección es transparente al sonido, esto permite poder poner altavoces por detrás de la misma, de modo que las ondas sonoras lleguen a los espectadores aprovechando una fuente central (oculta a los ojos de los videntes pero no a sus oídos).

Con motivo de que la pantalla de proyección es transparente, deberemos considerar la pared situada detrás de la misma, como el material con un comportamiento acústico en esa zona de la sala. Por comodidad nos referiremos a él como 'pantalla'.

Esta zona tiene poca absorción (los altavoces L, C y R y la pared con estructuras metálicas para la sujeción de estos). Y este bajo grado de absorción suponía el principal problema originando ecos en las butacas centrales, debido a que la reflexión de las ondas sonoras en la pantalla (de tercer orden, después de rebotar en techo, pared trasera y en ella misma) llegarán a los espectadores situados en dichas filas con un retraso importante, considerado eco, dañino para la óptima calidad acústica.

Finalmente esto se solucionó cambiando el tercio trasero del techo y no actuando sobre la pantalla.

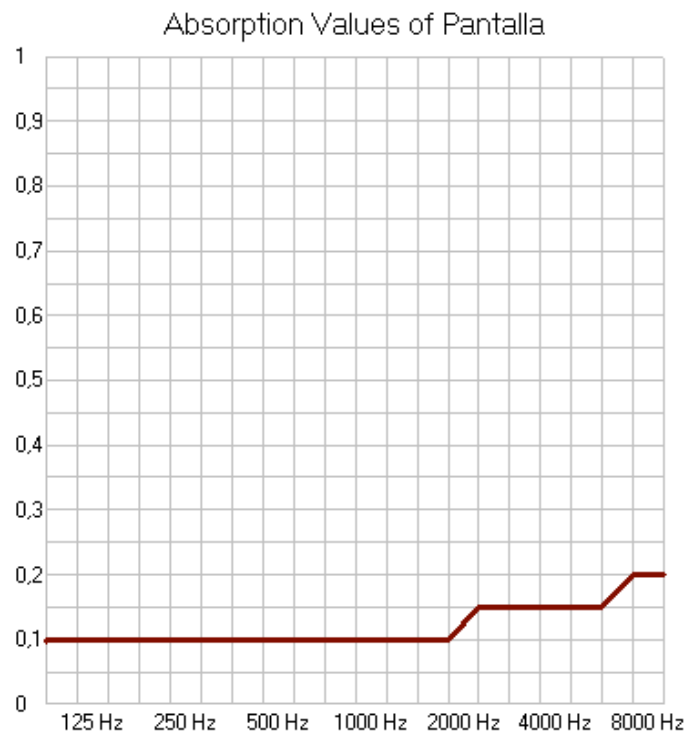


Fig. 7.13.: Valores de absorción de la pantalla

7.3.2. SUELO

Recubre todo el suelo del recinto, incluidas las escaleras. El material es pavimento de goma y tiene un coeficiente de absorción muy bajo.

Es la parte coloreada en gris, plano horizontal, en la primera figura de distribución de materiales.

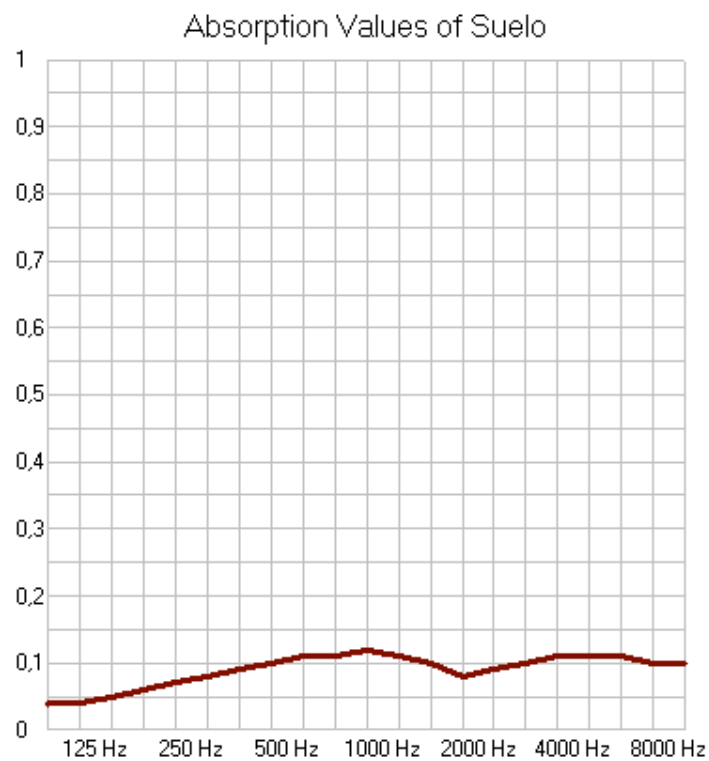


Fig. 7.14.: Valores de absorción del suelo

7.3.3. TELA PAREDES

Es la tela con la que se cubre las paredes de la sala para conseguir un comportamiento acústico idóneo. Esta tela tiene cierto nivel de coeficiente de absorción de manera que evita que haya una aglomeración de reflexiones dentro del recinto, que al ser acotado, produciría un efecto muy negativo.

Es tal el grado de absorción, que las reflexiones de las ondas directas en la pared situada enfrente del altavoz que radia, llegan a un nivel suficientemente pequeño para que no sean molestas.

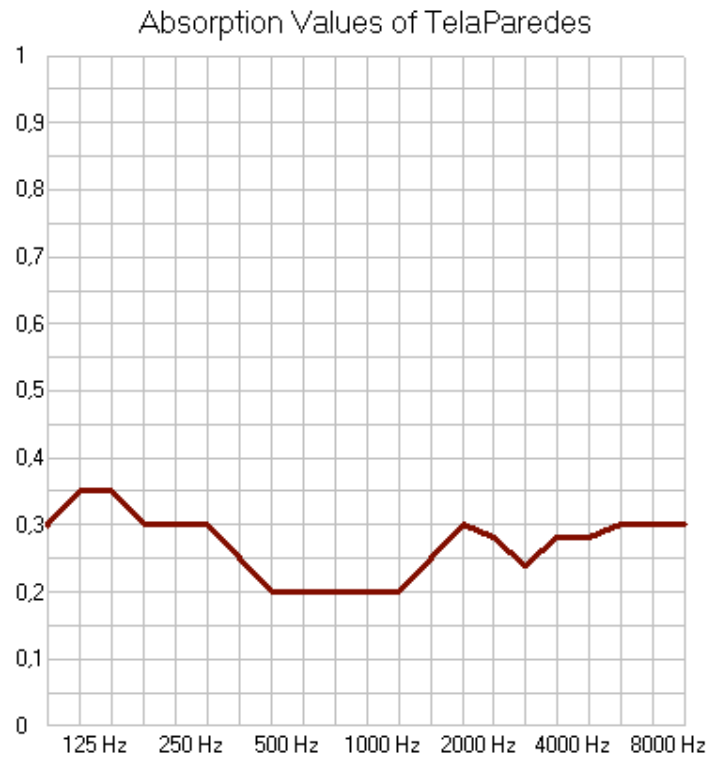


Fig. 7.15.: Valores de absorción de la tela de la paredes

7.3.4. PUERTAS

Las puertas utilizadas son específicas para salas de cine. Tienen una alta absorción para frecuencias más bajas, comportándose de forma parecida a la tela que recubre las paredes. En frecuencias altas la absorción es menor, al ocupar una superficie ínfima del total de la pared, esto no supone un problema llamativo.

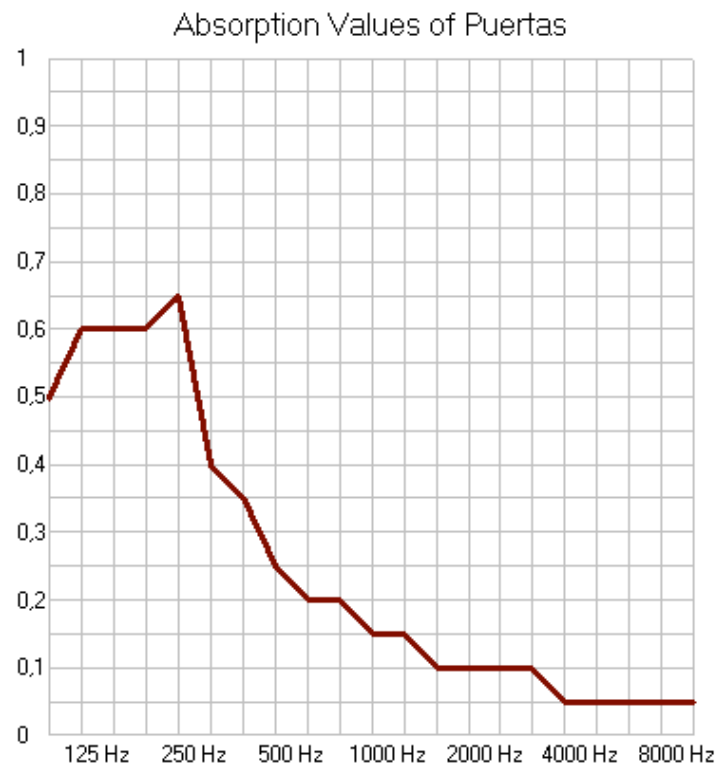


Fig. 7.16.: Valores de absorción de las puertas

7.3.5. CORTINAS

Las cortinas no están colocadas en la sala como meros adornos. Se encuentran localizadas entre los altavoces situados en las paredes laterales (coloreadas de naranja en las figuras de distribución de materiales) y tienen la función de absorber de una manera específica las ondas provenientes de los altavoces que tienen en la pared de enfrente.

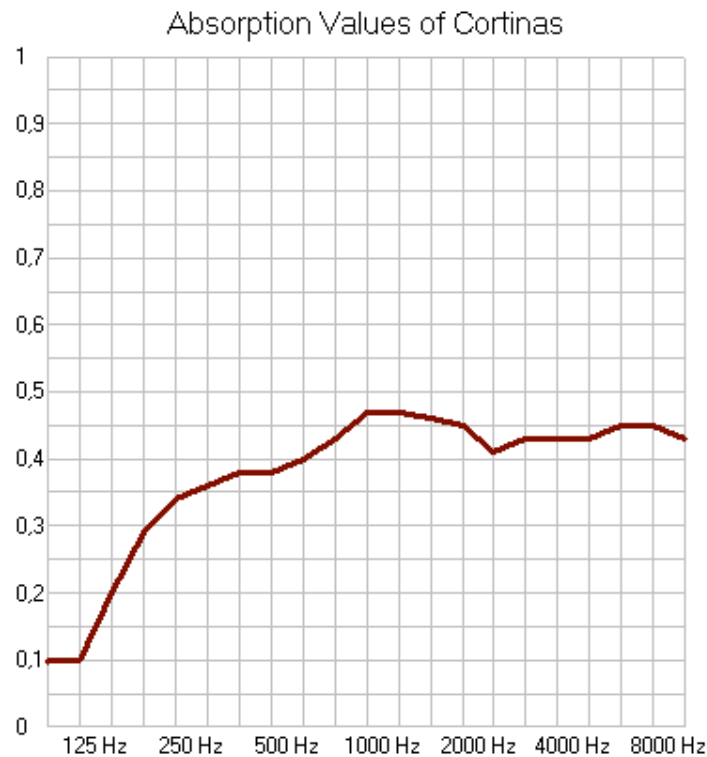


Fig. 7.17.: Valores de absorción de las cortinas

7.3.6. BUTACAS

Corresponde a la zona donde se sitúan sentados los espectadores. En el apartado diseño se explica que se tiene en cuenta a las propios espectadores sentados para el cálculo de volúmenes, etc... Del mismo modo les tendremos en cuenta a la hora de obtener su coeficiente de absorción en función de la frecuencia.

Las butacas están forradas de tela y acolchadas tanto en el asiento como en el respaldo y posabrazos.

Corresponde a toda la zona coloreada de rojo en la figura de distribución de materiales.

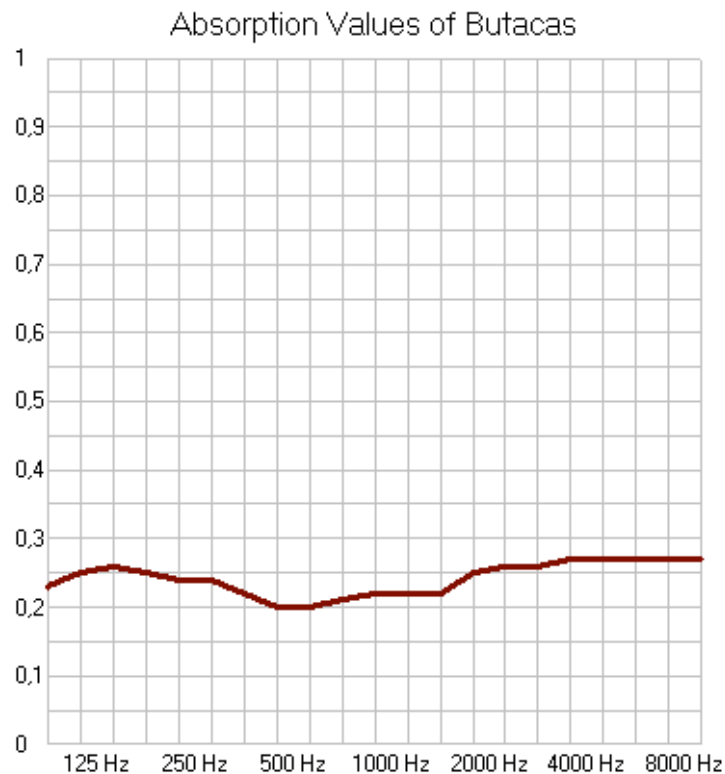


Fig. 7.18.: Valores de absorción de las butacas

7.3.7. QUITAMIEDOS

Son las dos semiparedes que se sitúan en los pasillos para que no haya peligro de caída a los mismos cuando estés subiendo las escaleras en la zona de butacas. Está coloreado de un gris un poco más oscuro que el suelo y se descubren en la parte opuesta a las puertas en el pasillo de acceso a la sala.

No tienen una función acústica, están simplemente por seguridad, por lo que se adaptan poco a los requisitos acústicos. Están forradas por una especie de hilo grueso enrollado, que tiene unos coeficientes de absorción medios, excepto para baja frecuencia que son bajos.

Son superficies bastante pequeñas y que no afectan demasiado a la acústica de la sala.

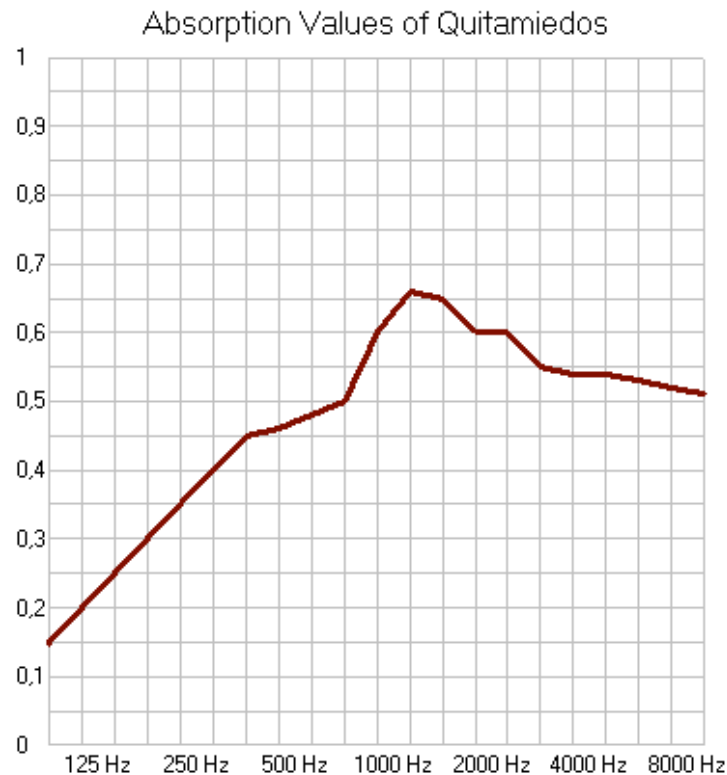


Fig. 7.19.: Valores de absorción de los quitamiedos

7.3.8. VIDRIO

La ventana de proyección está compuesta de vidrio. Tiene unas características desfavorecedoras acústicamente hablando (altamente reflectivo). Se pensó en cubrir el cristal vertical de un material absorbente, como de lana de roca de 40mm, excepto en el pequeño espacio imprescindible para el paso de la imagen del proyector. Esta solución no suponía una mejoría, debido a que la ventana es tan pequeña, que es inapreciable el cambio, por lo que se dejó como estaba.

El vidrio está coloreado de azul celeste y se puede ver en la segunda figura de distribución de materiales. Separa la cabina de proyección de la propia sala.

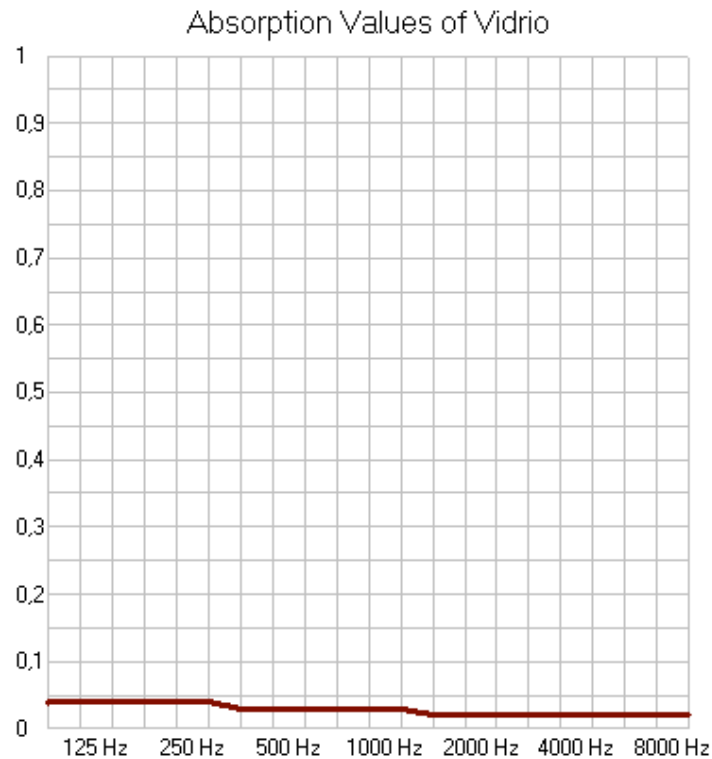


Fig. 7.20.: Valores de absorción del vidrio

7.3.9. TECHO

El techo es la zona elegida para introducir los cambios que producen una mejora acústica. Como ya se ha explicado, los ecos se contrarrestan metiendo una textura difusa en el tercio de techo más alejado de la pantalla de proyección. De este modo las ondas se reflejarán en todas direcciones evitando la concentración en determinadas butacas.

Además el material tendrá un alto coeficiente de absorción.

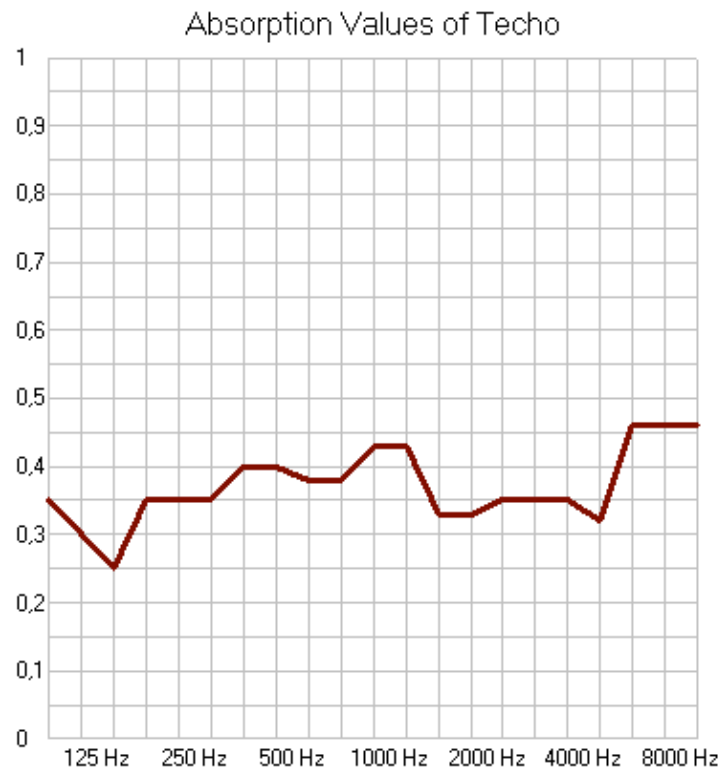


Fig. 7.21.: Valores de absorción del techo

7.4. ALTAVOCES

7.4.1. CONFIGURACIÓN ALTAVOCES

En la siguiente figura se puede apreciar la configuración que recomienda Kelonix Cinema Sound (la marca de altavoces utilizados en los cines Kinépolis) para una sala de cine de un tamaño grande:

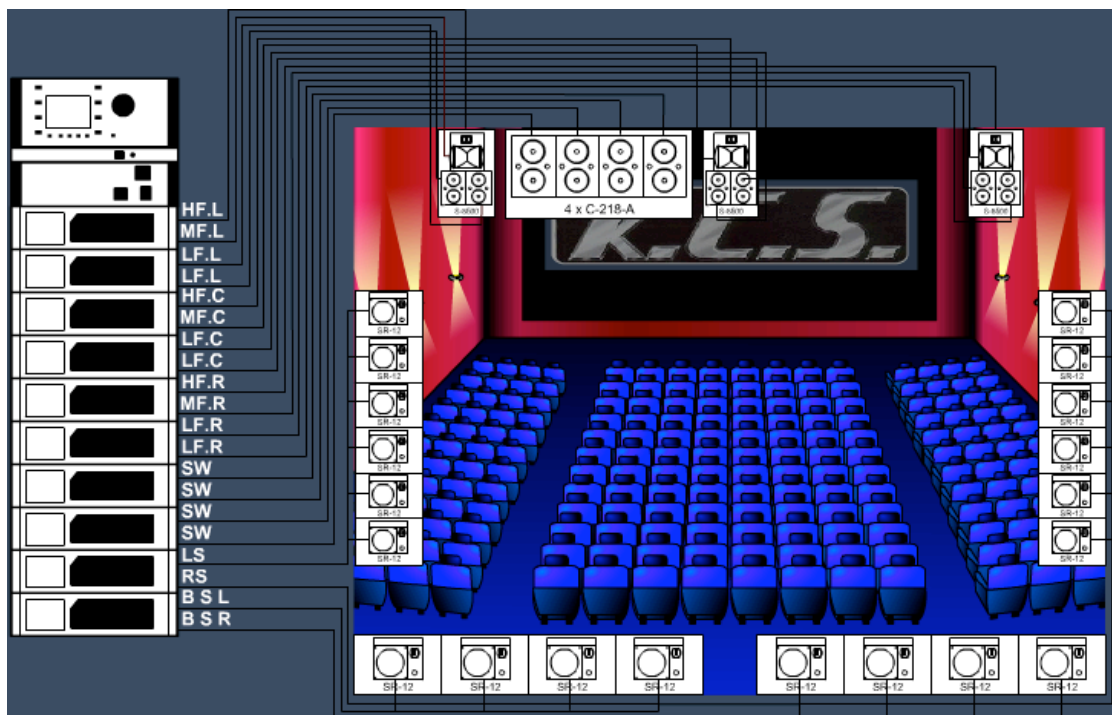


Fig. 7.22.: Configuración de altavoces recomendada por Kelonix

La sala 25 de Kinopolis añade a esta figura los siguientes altavoces:

- 3 LS (Left surround).
- 3 RS (Right surround).
- 1 BLS (Back Left Surround).
- 1 BRS (Back Right Surround).

Es decir, introduce más altavoces pero sin cambiar el modelo. Por tanto, el sistema surround de la sala 25 del Kinépolis es 7.1. Tiene los altavoces L, C y R, y el subwoofer detrás de la pantalla, los canales surround LS y RS laterales, y por último los canales surround BSL y BSR traseros con señal estéreo.

Kinépolis decide no introducir los altavoces intermedios entre L y C, y entre C y R (LC y RC) que es común en algunos sistemas 7.1.

El total de altavoces en la sala es, por tanto:

- 3 altavoces S-8500
 - 1 Left
 - 1 Center
 - 1 Right
- 4 altavoces C-218A
 - Subwoofer
- 28 altavoces SR-20
 - 9 Left Sorround
 - 9 Right Sorround
 - 5 Back Left Sorround
 - 5 Back Right Sorround

7.4.2. ESPECIFICACIONES ALTAVOCES

Vamos a tratar los tres modelos de altavoces que nos encontramos en la sala: altavoces K.C.S. S-8500, C-128A y SR-20.

7.4.2.1. Altavoces K.C.S. S-8500

Son los altavoces utilizados como canales izquierdo (L), centro (C) y derecho

(R). Están situados detrás de la pantalla de proyección.

Este sistema acústico tri-amplificado está diseñado especialmente para instalaciones cinematográficas de elevada calidad y espectacularidad en salas de gran capacidad, como es el caso de la sala 25.



Fig. 7.23.: Altavoces K.C.S. S-8500

Está compuesto por dos cajas provistas cada una de dos altavoces de 18" de diámetro y diseñadas para la reproducción óptima de las bajas frecuencias.

La sección de medios está compuesta por un motor de compresión con membrana de titanio de 4" de diámetro, embocadura de 3" de diámetro y difusor de direccionalidad constante.

La sección de agudos está compuesta por un motor de compresión con estructura magnética de neodimio, membrana de titanio de 4" de diámetro, embocadura de 2" de diámetro y difusor de direccionalidad constante.

Entre las mejoras que aporta este tipo de altavoz, cabe destacar las elevadas prestaciones acústicas SPL a 10 metros de distancia sobre el eje, la respuesta transitoria y una mayor potencia admisible para la respuesta acústica instantánea que exigen las nuevas bandas sonoras en las frecuencias de 5 kHz a 10 kHz.

COMPONENTES

Caja	2 x C-318-T
Altavoz graves	4 x S-1855 (18" Ø)
Motor medios	S-901
Difusor medios	SC-501
Motor agudos	ND-801
Difusor agudos	S-301
Soporte ajustable	SP-8

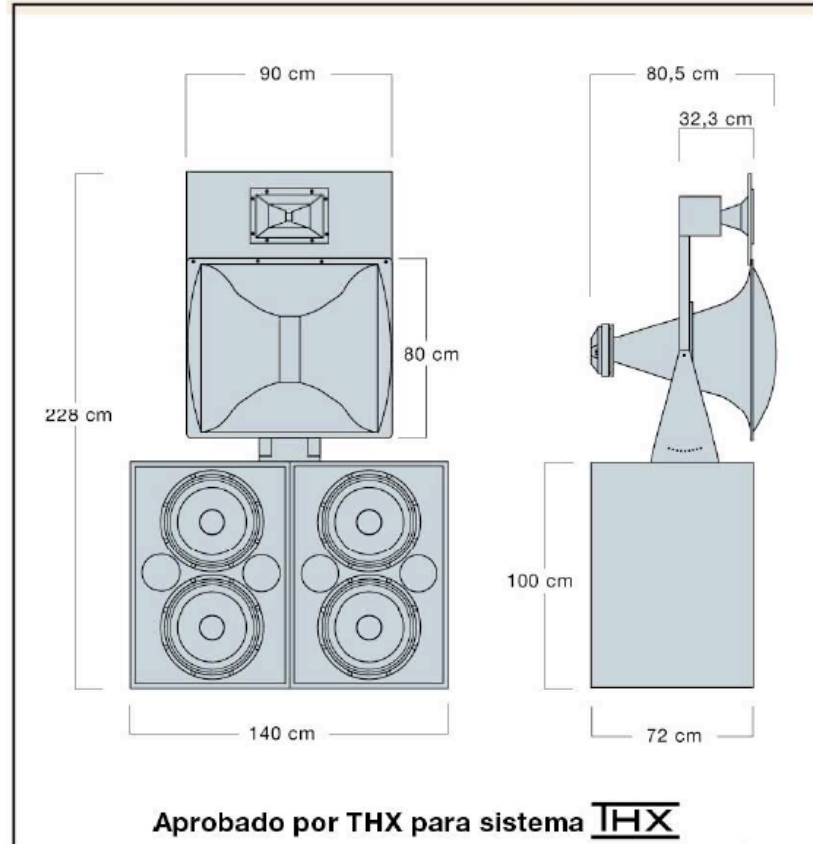


Fig. 7.24.: Componentes de los altavoces K.C.S. S-8500

Las especificaciones técnicas que encontramos en la propia página web de K.S.C. de este tipo de altavoz son las siguientes:

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS

Rango de Frecuencia (-10 dB)		35 Hz - 16 kHz
Respuesta de Frecuencia (+3 dB)		45 Hz - 12,5 kHz
Ángulo de Cobertura (-6 dB)		Horizontal 90º (de 300 Hz a 16 kHz) Vertical 45º (de 300 Hz a 16 kHz)
Factor de Direccionalidad (Q)		4
Índice de Direccionalidad (D)		6
Nivel Máximo de Salida		140 dB SPL (a 1m)
Frecuencia de Corte		Graves/Medios 300 Hz Medios/Agudos 2,5 kHz no incluido
Unidad de Graves	Impedancia	4 Ω (cada unidad)
	Potencia	2400 W AES
	Sensibilidad	103 dB (1W / 1m)
Unidad de Medios	Impedancia	8 Ω
	Potencia	100 W AES
	Sensibilidad	114 dB (1W / 1m)
Unidad de Agudos	Impedancia	16 Ω
	Potencia	75 W AES
	Sensibilidad	112 dB (1W / 1m)
Dimensiones (Al x An x P)		228 x 140 x 80,5 cm
Peso Neto		199 kg

Fig. 7.25.: Especificaciones técnicas de los altavoces K.C.S. S-8500

7.4.2.2. Altavoces K.C.S. SR-20

Son los altavoces utilizados como canales surround tanto laterales como traseros (LS, RS, BLS, BRS).

Del mismo modo que el tipo de altavoz S-8500, este sistema acústico para canal envolvente biamplificado y pasivo, está diseñado para instalaciones de gran tamaño y espectacularidad.



Fig. 7.26.: Altavoces K.C.S. SR-20

El sistema SR-20 es una caja acústica compuesta por un altavoz de graves de 15" de diámetro de elevadas prestaciones y dinámica. Para los agudos se utiliza un motor de compresión con membrana de titanio de 2" de diámetro. Su difusor de dispersion constante (100° x 60°) con embocadura de 1" de diámetro ofrece una amplia cobertura y proporciona a todos los espectadores una elevada respuesta y una buena distribución del sonido en las frecuencias bajas, medias y altas.

Además incorpora un filtro pasivo especial con entradas diferenciadas para graves y agudos y puede operar de dos maneras:

- Amplificación convencional pasiva, con ambas entradas conectadas en paralelo.
- Bi-amplificación pasiva, con los agudos y los graves conectados por separado.

COMPONENTES

Caja	SR-20
Altavoz graves	S-15 P (15" Ø)
Divisor pasivo	F-SR-20
Motor agudos	S-701
Difusor agudos	BC-96

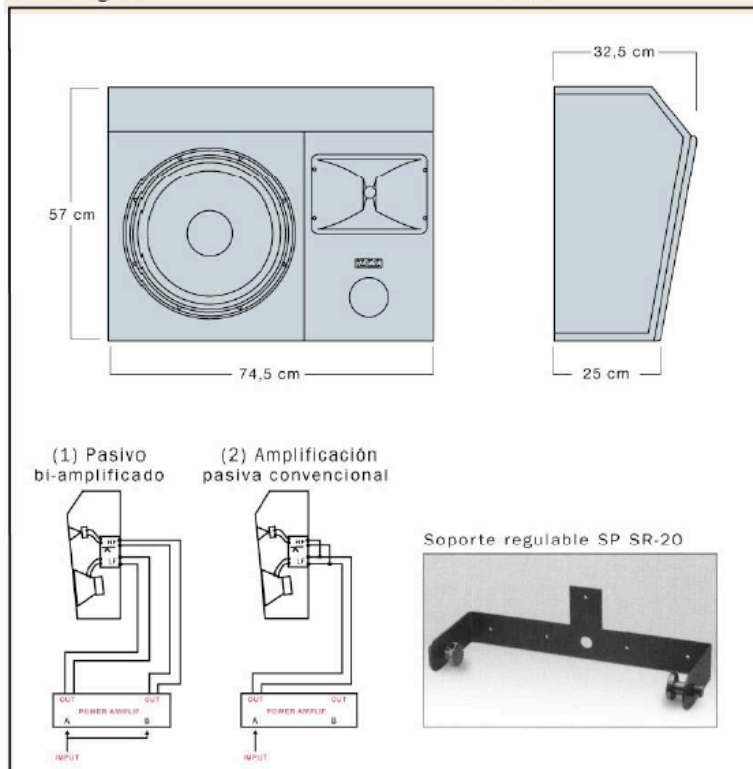


Fig. 7.27.: Componentes de los altavoces K.C.S. SR-20

El SR-20 está provisto de un conmutador que permite obtener dos curvas de respuesta diferentes en las instalaciones y ofrece las siguientes posibilidades:

- Respuesta a curva de reducción progresiva ISO 2969 de canal envolvente.
- Respuesta plana para mejorar las frecuencias altas.

A continuación podemos ver un gráfico de las especificaciones técnicas que nos proporciona K.C.S. en su página web de este tipo de altavoz:

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS

	SR-20 (Pasivo)	SR-20 (Pasivo Biamplicado)
Rango de Frecuencias (-10 dB)	40 Hz - 18 kHz	
Impedancia Nominal	8 Ω	Graves 8 Ω Agudos 8 Ω
CAPACIDAD DE POTENCIA		
Potencia Admisible <i>Pink Noise</i> (1)	350 W	Graves 300 W Agudos 75 W
Potencia Admisible Programa	700 W	Graves 600 W Agudos 150 W
Sensibilidad 1W/1m	98 dB S.P.L.	Graves 100 dB S.P.L. Agudos 102 dB S.P.L.
Frecuencia de corte	2 kHz Pasivo incluido	2 kHz Pasivo incluido
Dispersión horizontal	100°	
Dispersión vertical	60°	
Dimensiones (Al x An x P)	57 x 74,5 x 32,5 cm	
Peso neto	26 Kg	

(1) Basado en una prueba de 2 horas de duración utilizando una señal de ruido rosa con factor de cresta de 6 dB limitado en banda conforme a IEC 268-1 (1985)

Fig. 7.28.: Especificaciones técnicas de los altavoces K.C.S. SR-20

7.4.2.3 Altavoces K.C.S. C-218A

Estos altavoces son el sistema de graves (subwoofer). Están situados detrás de la pantalla de proyección.



Fig. 7.29.: Altavoces K.C.S. C-218A

Este sistema acústico contiene dos altavoces de graves K.C.S. S-1846 de 18" de diámetro. Estos motores, con cono de cobertura extra larga, bobina de 4" de diámetro, robusta circuitería magnética y un esquema de refrigeración muy cuidado, se caracterizan por una elevada potencia admisible y una reducida compresión de la potencia.

Ambos altavoces utilizan la tecnología de radiación directa y producen unos graves profundos y altamente lineales.

COMPONENTES

Caja	C-218-A
Altavoz 18"	2 x (S-1846)

Fig. 7.30.: Componentes de los altavoces K.C.S. C-218A

Las especificaciones técnicas de este tipo de altavoz las podemos encontrar de la misma forma que las anteriores en la página web de K.C.S:

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS	
Rango de Frecuencias (-10 dB)	20 Hz - 500 kHz
Impedancia Nominal	4 Ω
CAPACIDAD DE POTENCIA	
Potencia Admisible <i>Pink Noise</i> (1)	1.200 W
Potencia Admisible Programa	2.400 W
Sensibilidad 1W/1m	101 dB S.P.L.
Frecuencia de corte	80-110 Hz recomendado
Dimensiones (Al x An x P)	100 x 70 x 72 cm
Peso neto	74 kg

(1) Basado en una prueba de 2 horas de duración utilizando una señal de ruido rosa con factor de cresta de 6 dB limitado en banda conforme a IEC 268-1 (1985)

Fig. 7.31.: Especificaciones técnicas de los altavoces K.C.S. C-218A

7.4.3. CREACIÓN DE LOS ALTAVOCES CON EASE

A la hora de crear los altavoces que encontramos en la sala 25 de Kinépolis hemos buscado uno dentro de la base de datos del programa EASE, lo más parecido posible a los que se utilizan en nuestra sala, y a partir de ellos hemos modificado las características que no eran iguales.

Hemos tenido la suerte de encontrar altavoces muy similares dentro de la base de datos, de los que hemos tenido que cambiar muy pocas cosas (además siendo casi imperceptible el cambio, porque los datos eran muy cercanos).

Los altavoces a partir de los cuales hemos creado los K.C.S. que tenían similares características son los siguientes:

- Para los SR-20 nos hemos basado en los JBL 8340-A. Altavoces surround de JBL de muy parecidas prestaciones.
- Para los S-8500 nos hemos basado en los JBL 5674. Estos altavoces L, C, y R eran practicamente iguales en sus especificaciones.
- Y para los C-218A nos hemos basado en los Electro-Voice TL-880D. Unos subwoofer muy parecidos.

Al crear los altavoces, hemos sido fieles a las especificaciones de los mismos, pero hay detalles que hemos supuesto ya que la sala no nos ha ofrecido esta información. Por tanto, la orientación y la potencia de radiación son aproximaciones. Del mismo modo que sucedía con los coeficientes de absorción de los materiales de la sala, esto supondrá desligarnos en términos numéricos de los resultados reales de los parámetros acústicos de la sala en la simulación, pero debido a que estos cambios serán mínimos (puesto que trabajamos dentro de unos márgenes reales ofrecidos por K.C.S. en el caso de la potencia de radiación) y como conceptualmente no nos desviamos del fin del proyecto, es interesante seguir con él.

Por tanto, debemos tener en cuenta al valorar los parámetros, en el estudio de la simulación, que no hemos reconstruido de forma totalmente precisa la sala y esto puede llevar a alguna pequeña diferencia respecto de la realidad.

La distribución de los altavoces queda de la siguiente forma (los altavoces están representados en azul):

- Vista desde el centro de la pantalla (Surround)

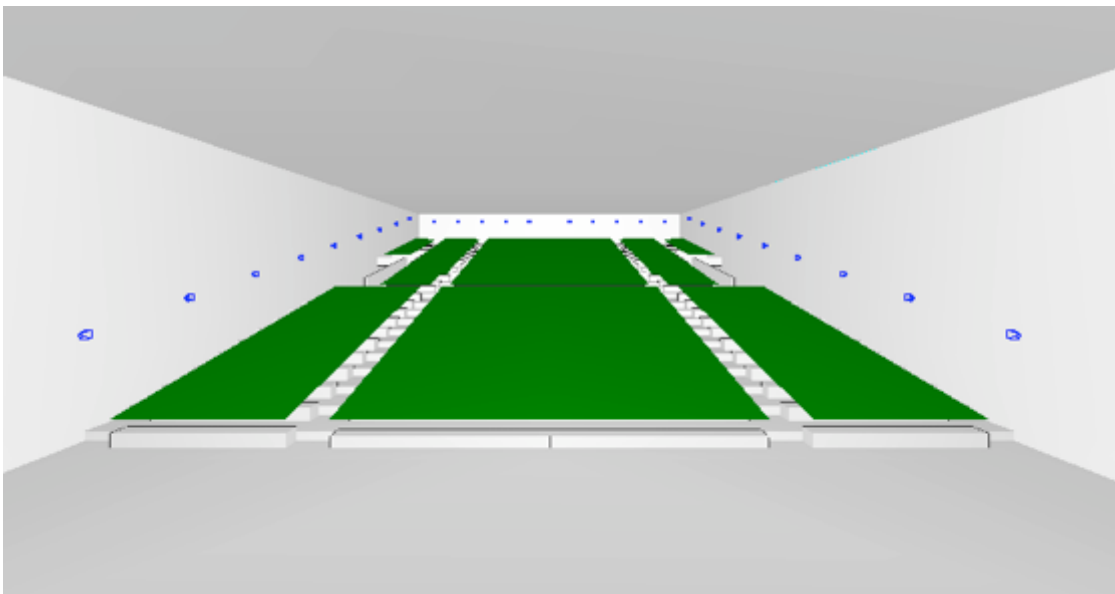


Fig. 7.32.: Vista de los altavoces desde la pantalla

- Vista desde la ventana de proyección (En el fondo: L,C,R y LFS;
Laterales: surround)

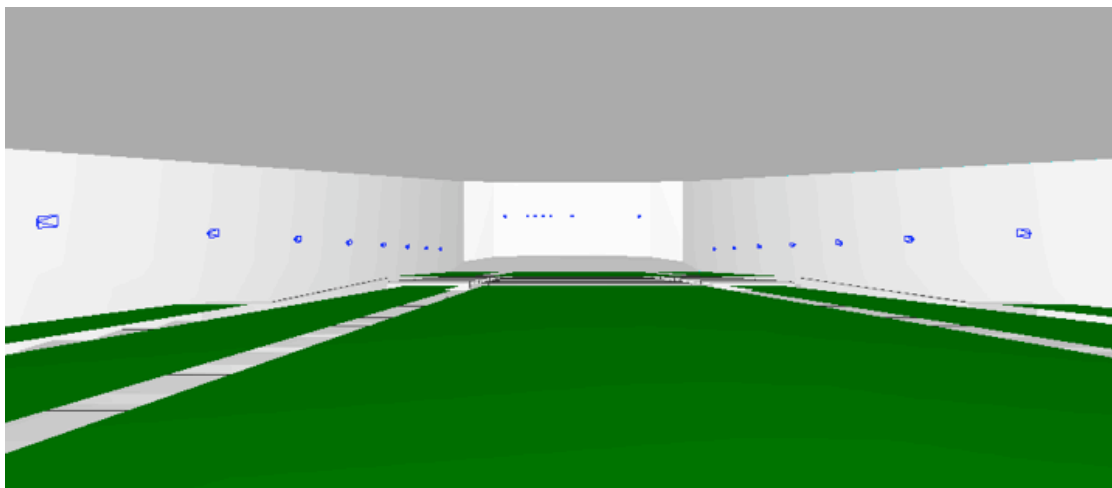


Fig. 7.33.: Vista de los altavoces desde la ventana de proyección

- Vista desde una esquina

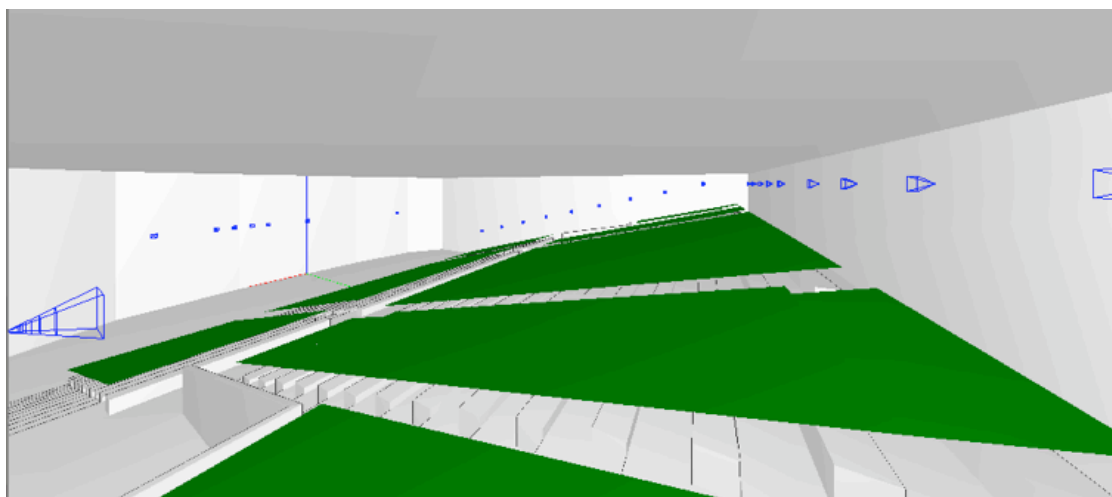


Fig. 7.34.: Vista de los altavoces desde una esquina

En las anteriores imágenes se puede observar que los altavoces surround responden a una simetría a lo largo de las paredes laterales y trasera.

En la siguiente figura se puede apreciar más claramente los altavoces L, C y R y el equipo subwoofer que se encuentra entre los altavoces L y C.

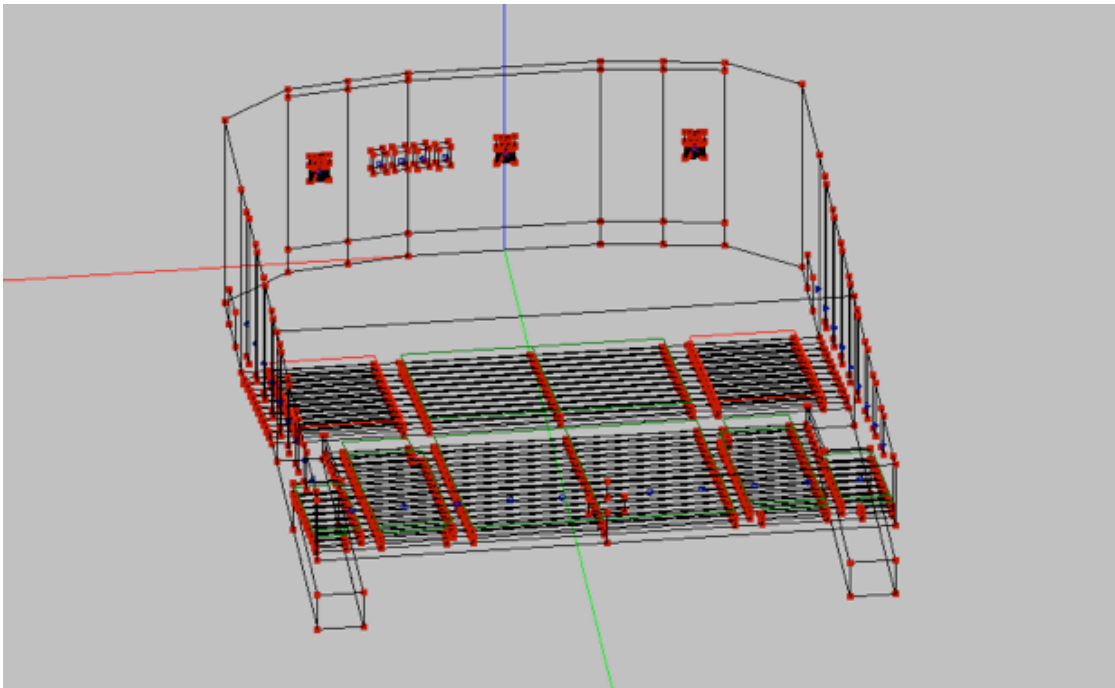


Fig. 7.35.: Vista aérea de los altavoces

7.5. CONSTRUCCIÓN DE LA SALA

EASE nos permite dos opciones a la hora de empezar con la construcción de un recinto, nos permite modificar uno ya construido o empezar uno totalmente nuevo. Como nosotros queríamos realizar el estudio de una sala en concreto, utilizamos la segunda opción.

7.5.1. EDICIÓN DE LA SALA CON EASE

A través del módulo EDIT PROJECT podemos crear nuestro proyecto. Nos permite definir vertices, caras, etc., para la construcción de la sala y posteriormente introducirle las propiedades de materiales, orientación, altavoces...

En la siguiente figura se puede ver la ventana de edición de una de las caras del recinto. Aquí podemos modificar sus propiedades: redefinir vértices, material de revestimiento, textura, etc.

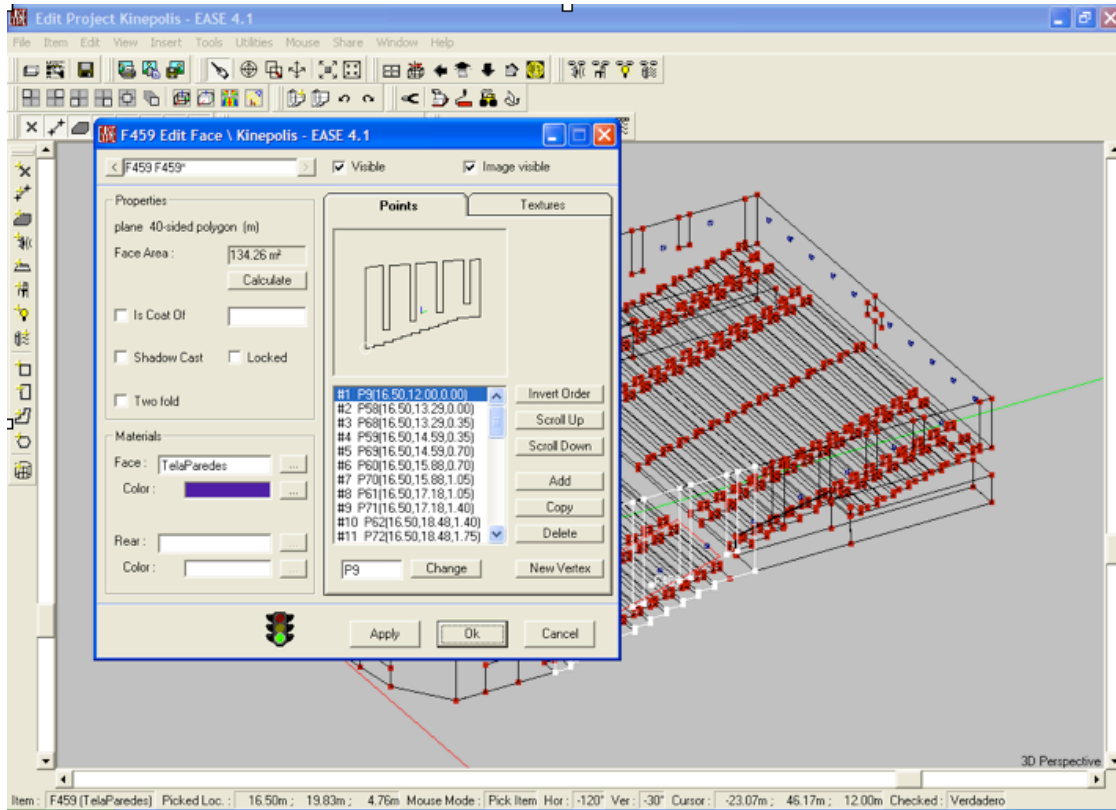


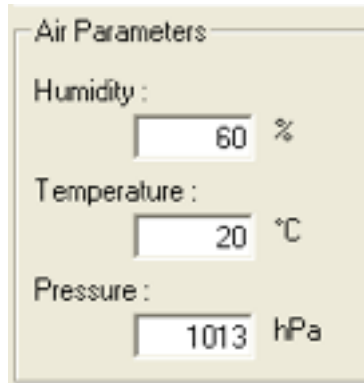
Fig. 7.36.: Ventana de edición de caras de EASE

Para asignarle un material se tiene que acceder a la base de datos, donde podremos encontrar todos los materiales disponibles, tanto los predeterminados como los que hemos creado nosotros.

Para poder realizar las simulaciones y obtener los resultados es obligatorio crear las áreas de audiencia, que deben coincidir con los lugares que ocupan los espectadores, en este caso con la zona de butacas. Estas áreas son superficies de medida, es decir no están hechas de ningún material.

Uno de los principales conflictos a la hora de crear la sala reside en las caras. Debemos tener especial cuidado y prestar atención en su creación, puesto que si se deja una cara vacía no será posible la simulación del recinto. Para este problema existe una herramienta de ayuda del programa EASE, denominada Check Holes, que te hace un chequeo de la sala buscando caras sin crear o dadas la vuelta (siempre tiene que tener la cara con propiedades por dentro) o vértices duplicados y facilita mucho el diseño.

Además hemos introducido los parámetros estándar para el aire en cualquier tipo de sala.

A screenshot of a software dialog box titled "Air Parameters". It contains three input fields: "Humidity" with a value of 60 and a percentage symbol (%), "Temperature" with a value of 20 and a degree Celsius symbol (°C), and "Pressure" with a value of 1013 and a hPa symbol (hPa).

Air Parameters	
Humidity :	60 %
Temperature :	20 °C
Pressure :	1013 hPa

Fig. 7.37.: Parámetros del aire

7.5.2. EDICIÓN DE LOS MATERIALES Y ALTAVOCES CON EASE

Dentro del módulo 'main' de EASE hay un submenú llamado 'maindatabases' en el que podemos seleccionar materiales, altavoces, lámparas y texturas.

Aquí te permite ver los materiales de la base de datos, modificarlos o crear unos nuevos. En este último caso puedes introducir el coeficiente de absorción para cada rango de frecuencias, y luego llamar el material con un nombre característico para su uso.

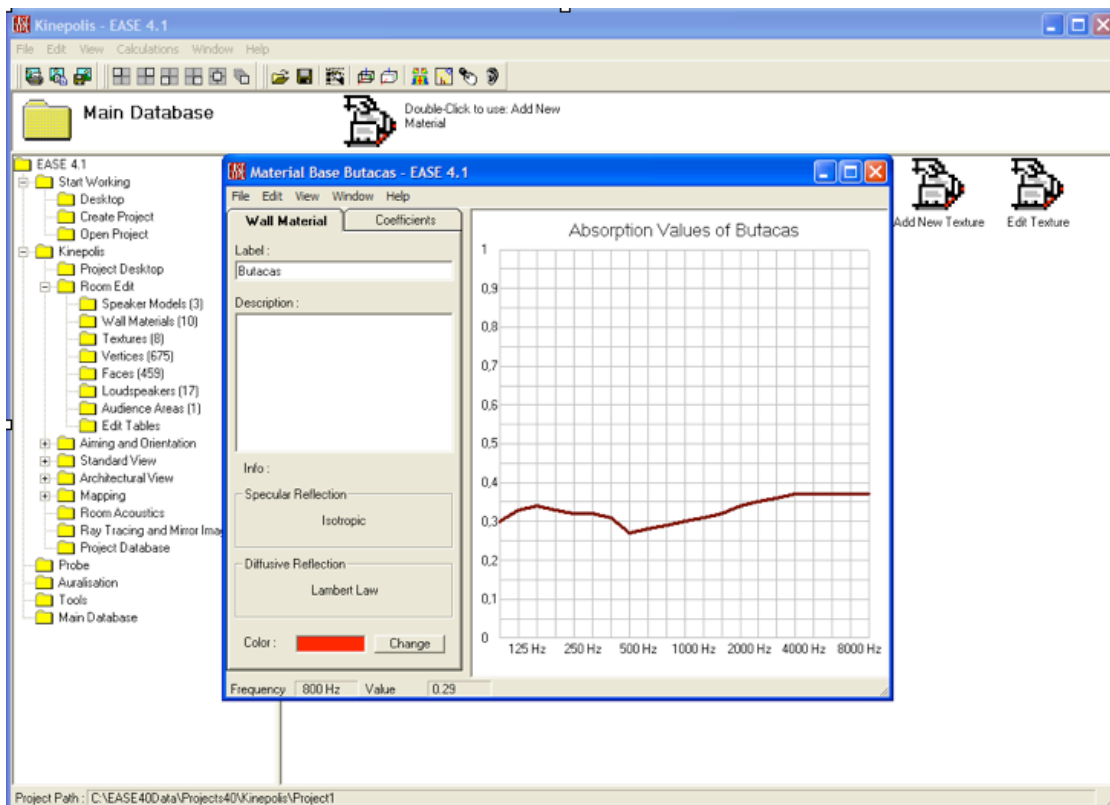


Fig. 7.38.: Ventana de edición de materiales de EASE

Del mismo modo podemos ver los tipos de altavoces de la base de datos, modificarlos o crear unos nuevos. En el caso de los altavoces es algo más complejo crearlos desde cero debido a la gran cantidad de datos que hay que introducir, siendo más sencillo buscar un altavoz que se asemeje al que quieres utilizar y cambiando los parámetros que difieran con el tuyo. Además, a las marcas comerciales cada vez les interesa más tener los datos de sus altavoces disponibles para programas de simulación de este tipo.

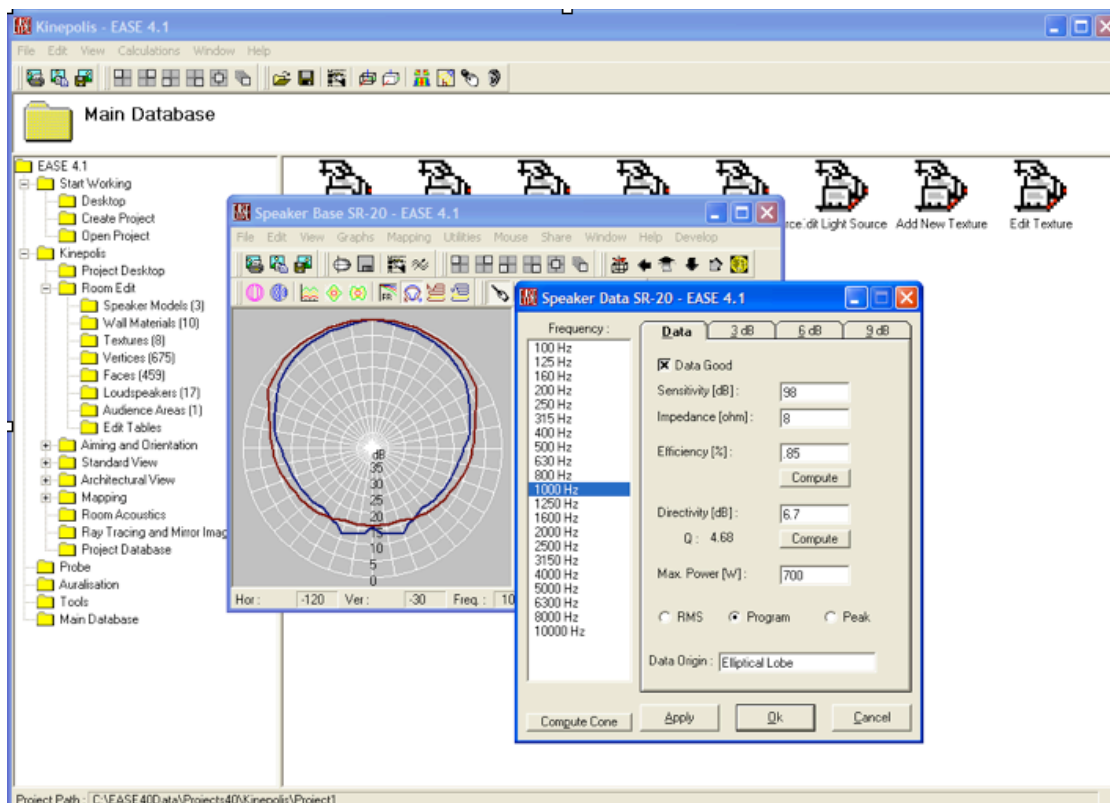


Fig. 7.39.: Ventana de edición de altavoces de EASE

7.6. ESTUDIO DE LA SIMULACIÓN:

En los estudios de los parámetros acústicos se encuentra la razón de la existencia de este tipo de programa informático (EASE). Nos permite realizar una gran cantidad de cálculos de una forma sencilla y barata.

Entre otros, nos permite realizar la estimación de los siguientes parámetros:

7.6.1. TIEMPO DE REVERBERACIÓN

Como ya hemos definido anteriormente (en el apartado de parámetros acústicos y en la teorías acústicas), es el tiempo que la energía acústica tarda en caer 60 dB desde que cesa la emisión de la fuente.

El programa EASE permite realizar tanto la estimación de Eyring como la de Sabine, pero dado que ésta última es mejor para salas 'vivas', con pequeño

grado de absorción, utilizamos la de Eyring que no introduce el error de Sabine para salas con materiales más absorbentes.

El tiempo de reverberación no es una magnitud totalmente suficiente para considerar si la sala es adecuada o no, pero es un parámetro orientativo sobre todo en fases de construcción de la sala para realizar ajustes.

Los valores del tiempo de reverberación se representa en la siguiente tabla:

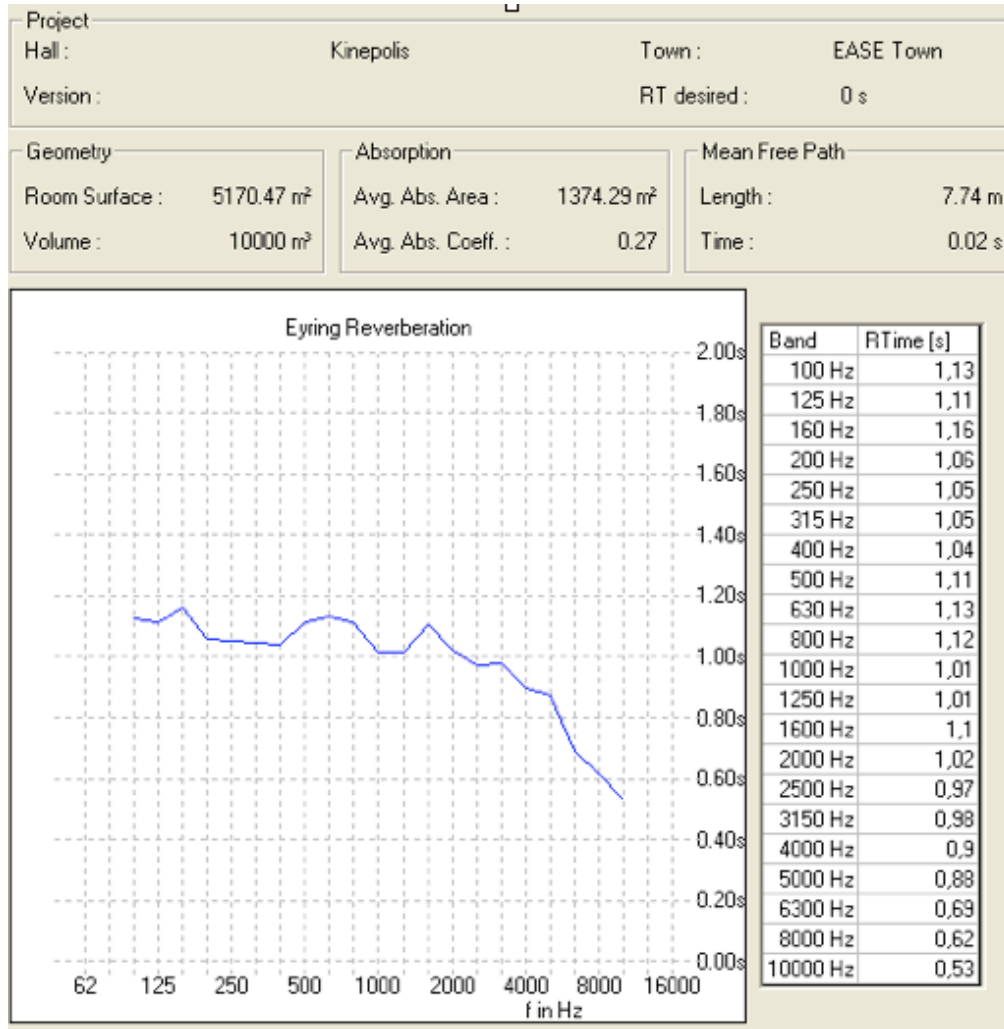


Fig. 7.40.: Tiempos de reverberación de la sala

Por tanto podemos observar que los valores se encuentran entre 0.9 y 1.2 en la mayoría de las frecuencias, exceptuando las más altas, lo que nos dice que cumple con los valores recomendados para una sala de cine.

Como ya hemos comentado, esta sala no sólo se utiliza para proyectar películas (aunque es su actividad principal), también se usa como sala de conferencias o

sala de conciertos (en este caso para presentaciones de disco íntimas y en acústico).

Los valores recomendados para una sala de conferencias son entre 0.7 y 1 segundos. Los valores obtenidos sobrepasan estas cifras por muy poco, por lo que también tendrá un comportamiento aceptable para este uso.

En cambio los valores recomendados para salas de concierto son mucho mayores, entre 1.8 y 2 segundos. Aún así no es preocupante, puesto que es una actividad que se realiza muy poco y, además, al ser acústico, es más fácil utilizar reverberadores artificiales que provoquen una percepción acústica mejor.

En la siguiente gráfica podemos observar los valores de RT contrastados con la tolerancia THX:

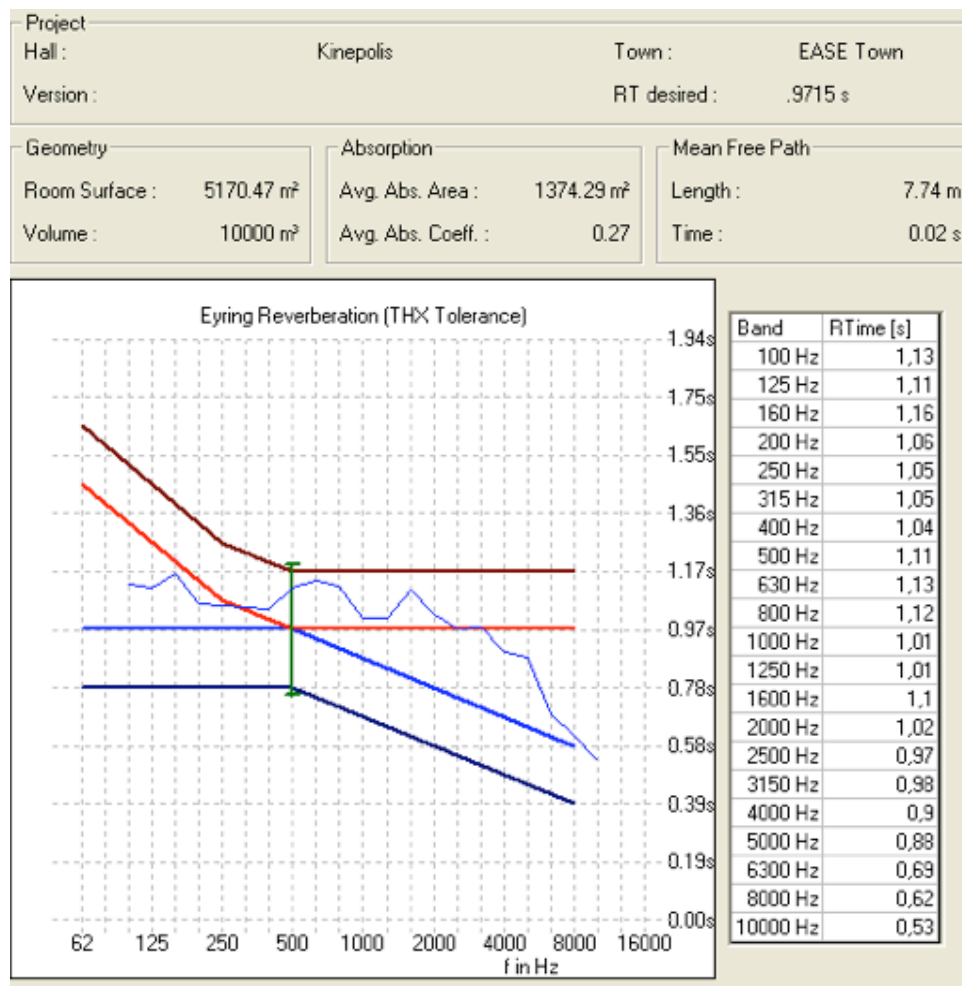


Fig. 7.41.: Tiempos de reverberación de la sala comparados con la tolerancia THX

También podemos ver que entra dentro de los márgenes de la tolerancia Dolby:

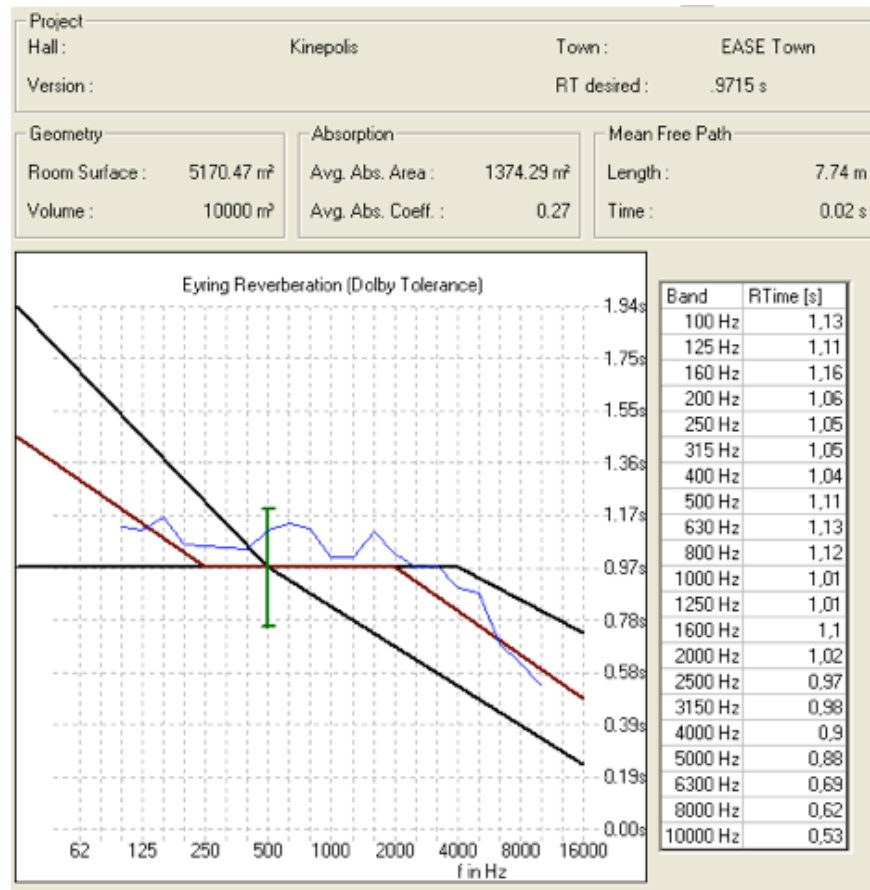


Fig. 7.42.: Tiempos de reverberación de la sala comparados con la tolerancia Dolby

Observamos que tanto para la tolerancia THX como para la Dolby, los valores de RT están dentro de los márgenes, por lo que deducimos que se cumplen los requisitos mínimos de calidad para este tipo de sala.

A partir de los valores de los tiempos de reverberación podemos obtener dos parámetros que se utilizan en salas con fines musicales:

7.6.1.1. Calidez acústica

Es la relación entre los tiempos de reverberación de las frecuencias bajas y medias. Se abrevia como BR.

$$BR = \frac{T_{60}(125Hz) + T_{60}(250Hz)}{T_{60}(500Hz) + T_{60}(1000Hz)} \quad (\text{Ec. 7.1.})$$

Representa la influencia de los sonidos graves de una sala, lo que subjetivamente está ligado a la calidez y suavidad de la música escuchada.

Los valores recomendados por Beranek están entre 1.10 y 1.45 s.

En esta sala haciendo los cálculos obtenemos un BR de 1.02 segundos, siendo un valor un poco bajo. De todas formas, los valores recomendados por Beranek están destinados a salas con fines únicamente musicales, por lo que su tiempo de reverberación es mayor en media. De esta forma podemos deducir que la calidez de la sala es un poco baja, pero aún así resulta cálida subjetivamente.

7.6.1.2. Brillo

Es la relación entre los tiempos de reverberación de las frecuencias altas y medias.

$$Br = \frac{T_{60}(2kHz) + T_{60}(4kHz)}{T_{60}(500Hz) + T_{60}(1kHz)} \quad (\text{Ec. 7.2.})$$

Representa esta vez la influencia de los sonidos agudos de una sala, midiendo la riqueza de un sonido claro y brillante.

Beranek recomienda un valor de $Br \geq 0,87$. Aunque debemos tener en cuenta que un sonido excesivamente brillante suena artificial resultando molesto, por lo que el brillo no debe superar la unidad. Cuanto mayor sea la absorción en el aire en altas frecuencias (la humedad relativa ayuda a una mayor absorción) se cumplirán mejor estas premisas.

Para nuestra sala obtenemos un Br de 0.9. Cumpliendo con los requisitos de estar entre 0.87 y 1. Por lo tanto es rica en claridad y brillantez.

7.6.2. RUIDO DE FONDO

Conocemos los niveles de ruido de fondo medios de la sala (nos los proporciona el propio Kinépolis), son los siguientes:

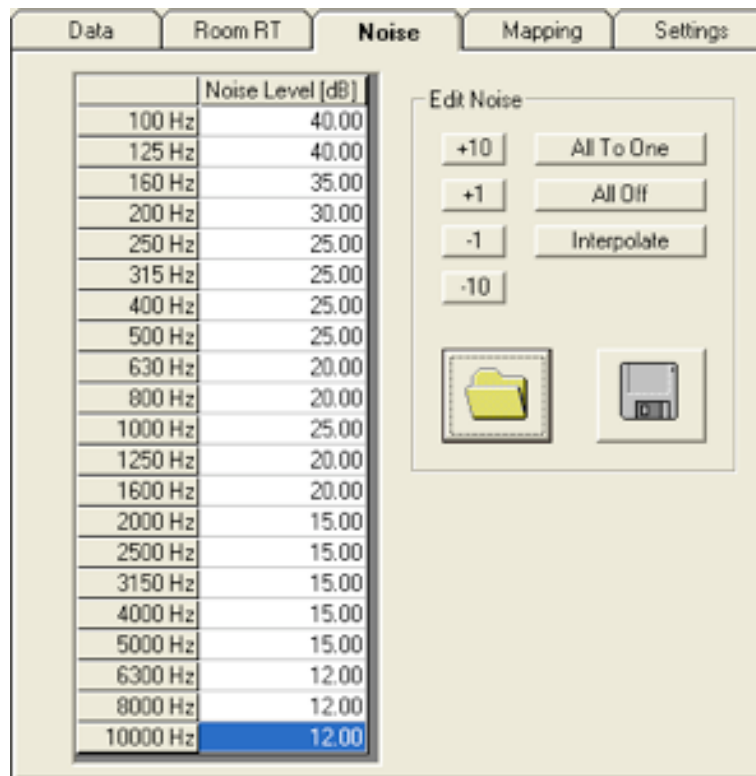


Fig. 7.43.: Ruido de fondo de la sala

Cumple con los valores recomendados (Curva NC 15-25). Esto supone, a grosso modo, estar por debajo de los 35 dB a frecuencias bajas, menos de 25 dB a frecuencias medias y menos de 15 dB a frecuencias altas.

7.6.3. INTELIGIBILIDAD (ALCONS, RASTI)

Para realizar la valoración de la señal vocal utilizaremos los parámetros ALCONS y RASTI que EASE nos permite calcular.

Sabiendo que los valores óptimos son los siguientes, entraremos a valorar la inteligibilidad de la sala:

%ALCons	STI / RASTI	Inteligibilidad
0 % – 1,4 %	0,88 – 1	Excelente
1,6 % – 4,8 %	0,66 – 0,86	Buena
5,3 % – 11,4 %	0,5 – 0,64	Aceptable
12 % – 24,2 %	0,36 – 0,49	Pobre
27 % – 46,5 %	0,24 – 0,34	Mala

Fig. 7.44.: Valores óptimos de ALCONS y RASTI

7.6.3.1. **ALCONS**

Es el porcentaje de pérdida de la articulación de consonantes. Cuanto mayor sea, mayor será la inteligibilidad en la sala.

El inconveniente que tiene es que presenta resultados muy buenos cuando el tiempo de reverberación es pequeño en zonas cercanas al campo directo y penaliza los resultados obtenidos ante tiempos de reverberación grandes alejados del campo directo.

Los niveles de ALCONS son los siguientes:

Durante el estudio de simulación se ha procedido a obtener los resultados de los parámetros para todas las frecuencias. No obstante, por comodidad del lector y limpieza del texto, en este apartado sólo se mostrarán los resultados para frecuencias de 1000 Hz, ya que es una frecuencia representativa e interesante para el análisis acústico. Los resultados obtenidos para el resto de frecuencias se añaden en un anexo (CD).

- Distribución:

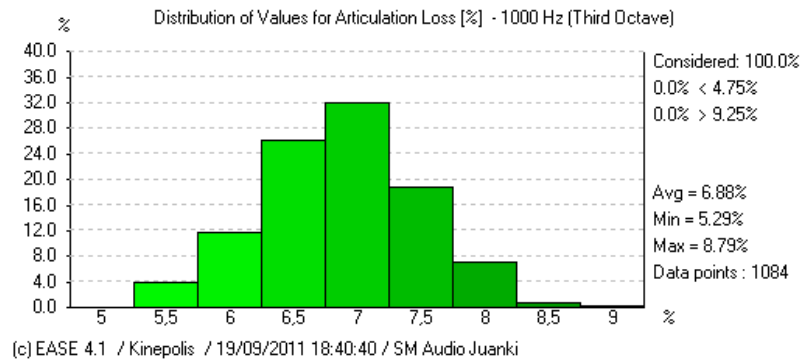


Fig. 7.45.: Distribución de los niveles de ALCONS

- ALCONS 3D:

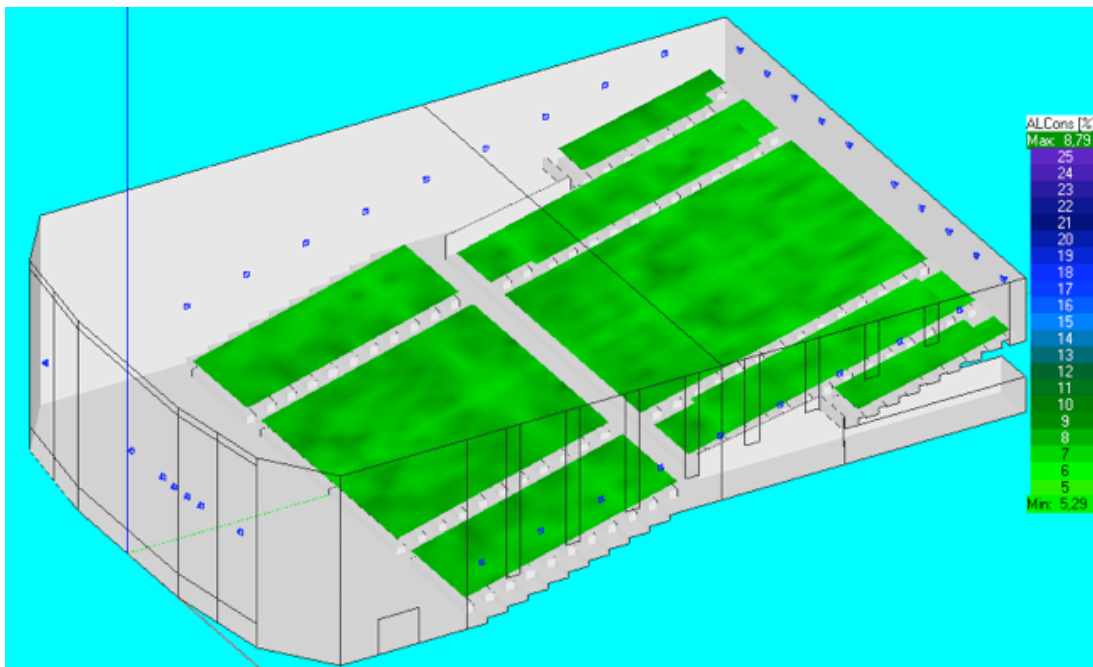


Fig. 7.46.: Simulación 3D de los valores del ALCONS

Se observa que la media del ALCONS es 6.88, teniendo un mínimo de 5.29 y un máximo de 8.79. Está encuadrada por tanto en la categoría de una

inteligibilidad normal-alta.

También se aprecia que en la parte superior de la sala se tienen unos valores un poco mejores.

7.6.3.2. RASTI

Es un método de cálculo rápido, que abarca del 0 al 1 siendo mala u óptima la inteligibilidad respectivamente.

Los valores de RASTI son los siguientes:

- Distribución:

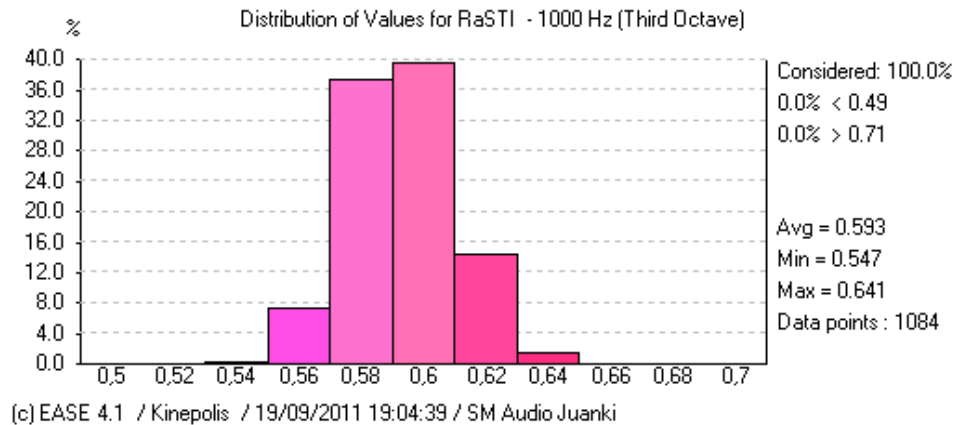


Fig. 7.47.: Distribución de los niveles del RASTI

- RASTI 3D:

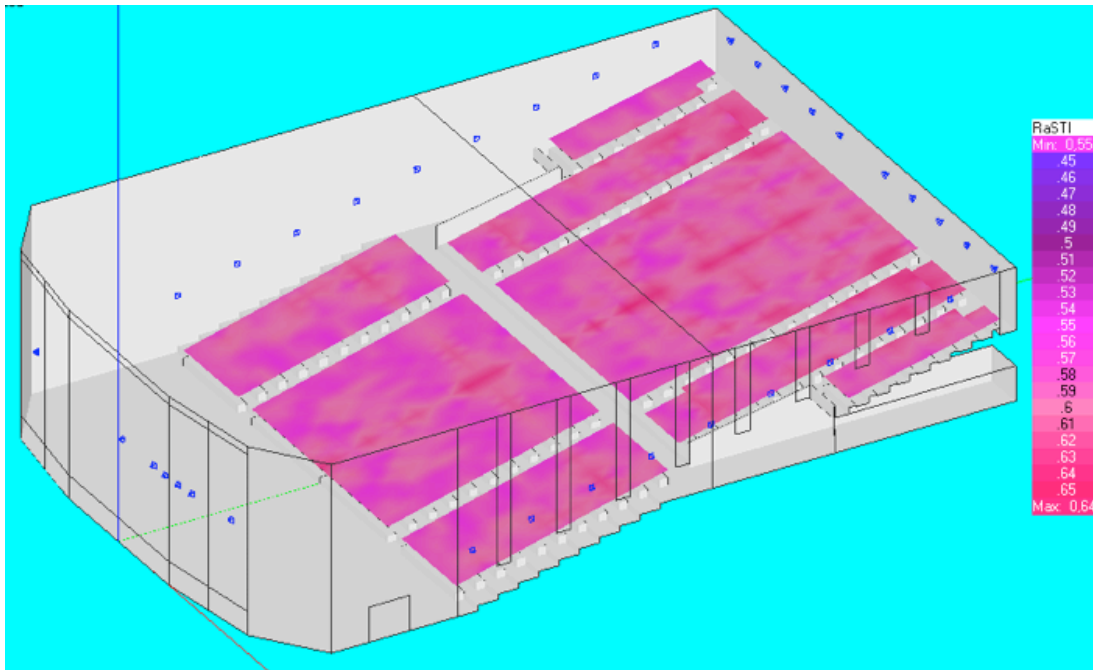


Fig. 7.48.: Simulación en 3D de los niveles del RASTI

Se observa que la media del RASTI es 0.593, teniendo un mínimo de 0.547 y un máximo de 0.641. Está encuadrada por tanto en la categoría, al igual que el ALCONS, de una inteligibilidad normal-alta.

También de la misma forma que en el ALCONS, se puede apreciar que en la parte superior de la sala se tienen unos valores un poco mejores.

7.6.4. CLARIDAD (C50, C80)

Estos dos parámetros sirven para la medición de la proporción efectiva de las primeras reflexiones.

7.6.4.1. Claridad de la voz (C50)

Como se ha explicado anteriormente en el apartado de parámetros acústicos el C50 se usa para salas dedicadas a la palabra. Mide la relación entre la energía sonora recibida durante los primeros 50 ms después de recibir el sonido directo (incluido) y la energía restante.

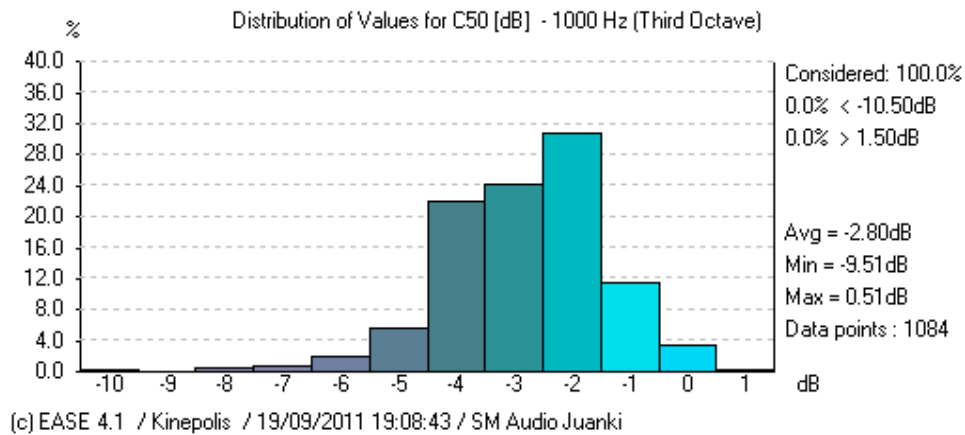


Fig. 7.49.: Distribución de los niveles de C50

Sus valores deben oscilar entre -4 y 0 dB en las bandas de 500, 1000 y 2000 Hz. Vemos que prácticamente la mayor parte de la sala se encuentra dentro de esos valores, teniendo una media de -2.80 dB, por tanto, se puede considerar que hay buena claridad en la mayoría de las butacas.

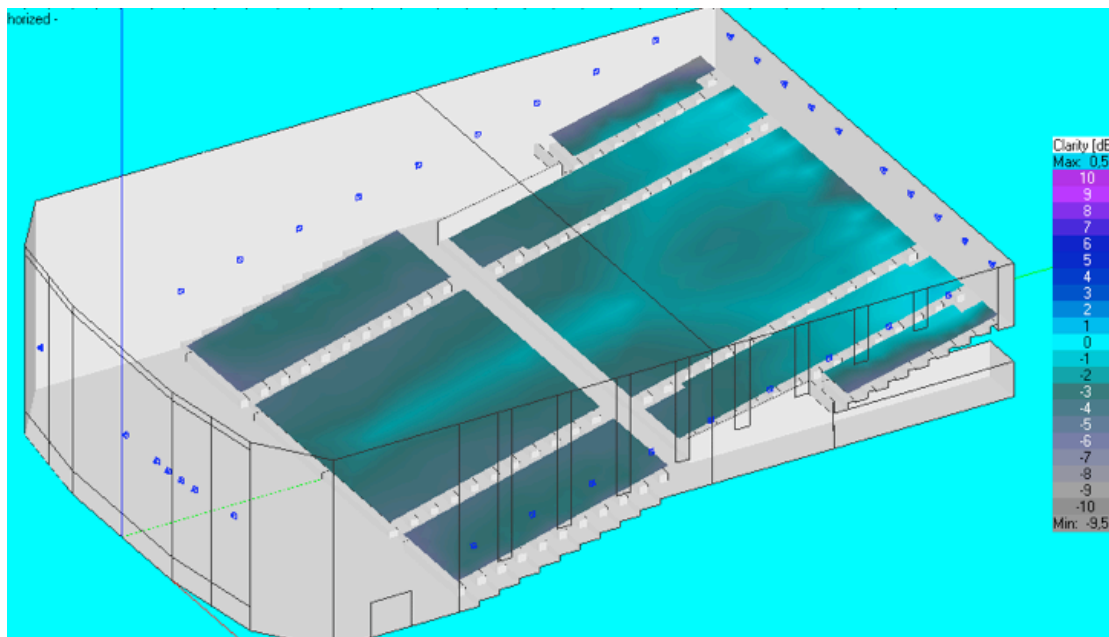


Fig. 7.50.: Simulación en 3D de los niveles de C50

Donde se aprecia una menor claridad es en la parte baja-interior de las butacas situadas abajo en los extremos y en la parte baja-exterior de las butacas situadas en la parte de arriba en los extremos. Aún así es suficientemente claro

el sonido, y como ya hemos estudiado antes, la inteligibilidad es buena, por tanto no hay problemas.

Se puede aumentar la claridad de voz disminuyendo el nivel de sonido reverberante.

7.6.3.2. Claridad musical (C80)

Este parámetro se utiliza para salas destinadas a música (el cine está expuesto de forma continuada a la música). Mide la relación entre la energía sonora recibida durante los primeros 80 ms después de recibir el sonido directo (incluido) y la energía restante.

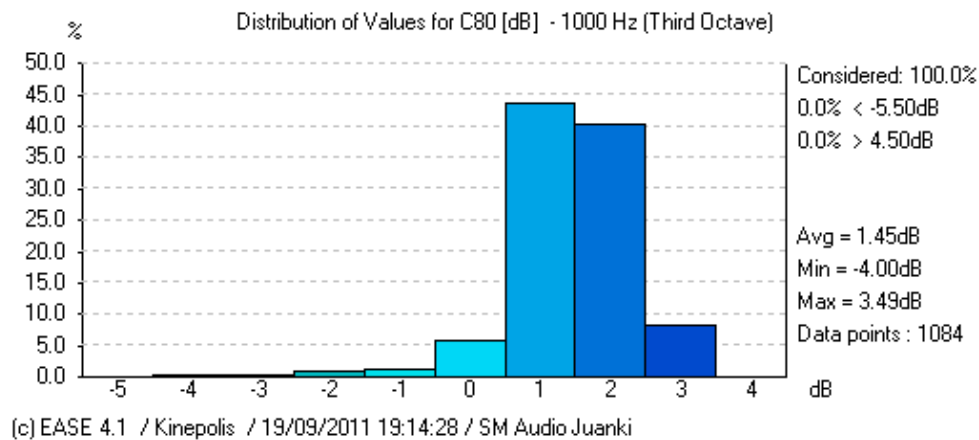


Fig. 7.51.: Distribución de los niveles de C80

Sus valores deben oscilar entre -2 dB y 4 dB, vemos que todos los puntos de la audiencia se encuentran dentro de estos valores, teniendo una media de 1.45 dB. Esto significa que la claridad musical va a ser absoluta para todos los espectadores, aunando una buena sonoridad e inteligibilidad.

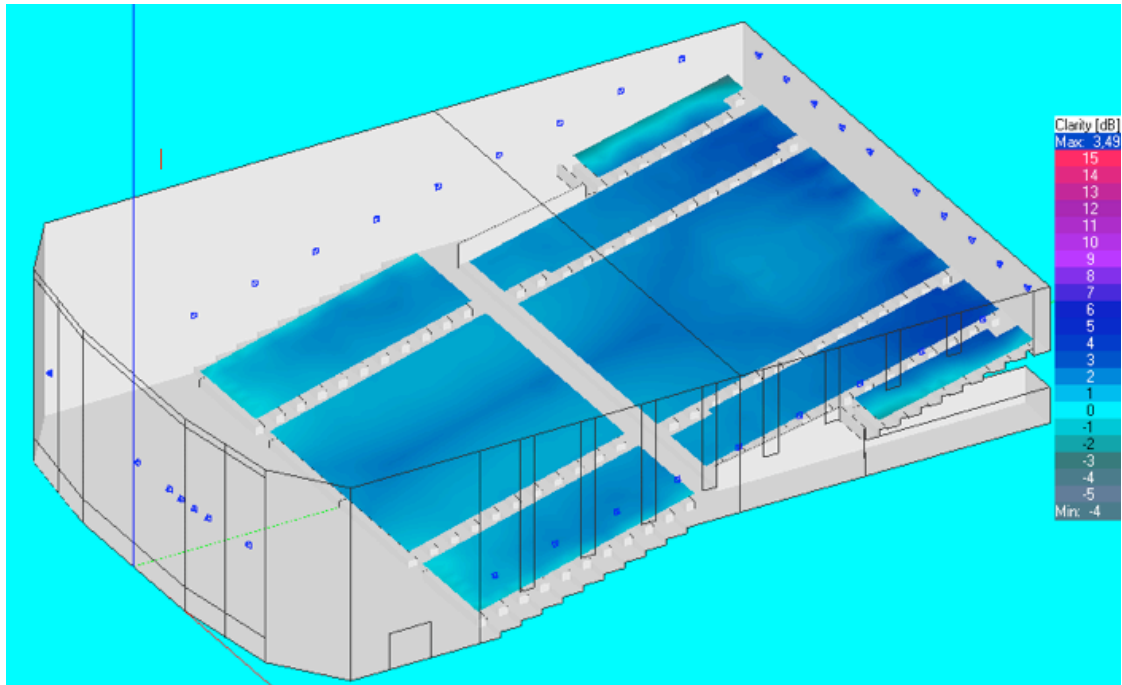


Fig. 7.52.: Simulación 3D de los niveles de C80

7.6.5. NIVEL DE PRESIÓN SONORA (DIRECT SPL, TOTAL SPL)

Con los niveles de presión sonora podemos analizar si se cumplen los requisitos de recubrimiento uniforme y esto nos permite hablar de la sonorización con criterios de nivel.

7.6.5.1. Direct SPL

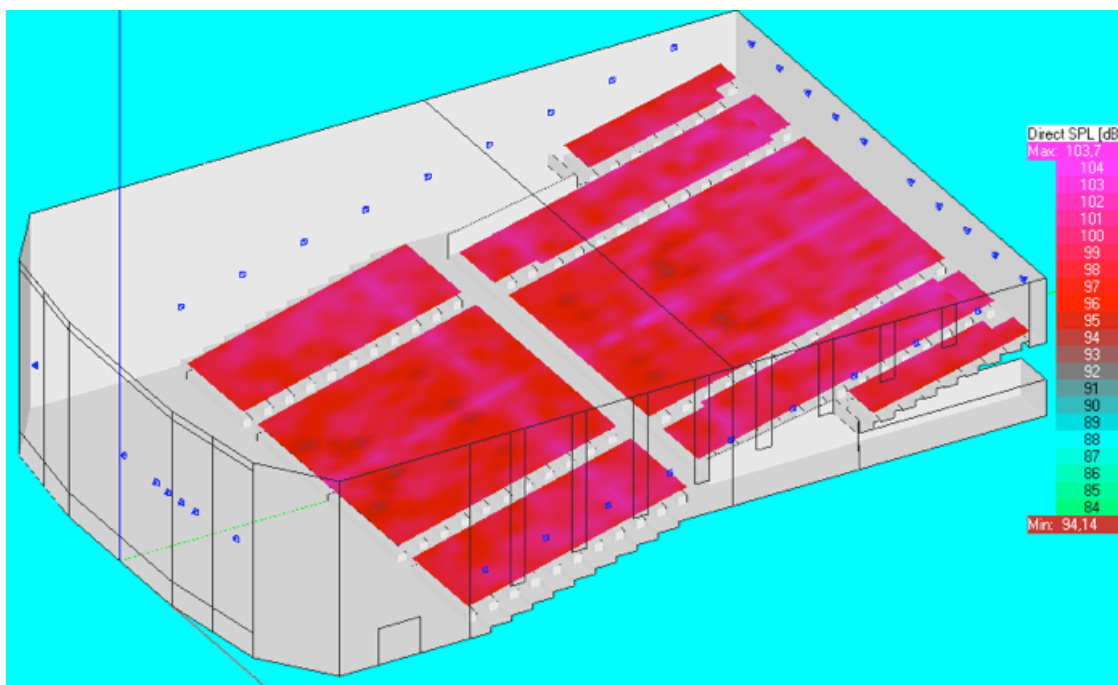


Fig. 7.53.: Simulación 3D de los niveles del Direct SPL

Vemos que, a 1000 Hz, los valores del nivel directo en todas las áreas de audiencia no oscilan en un margen de 3 dB, lo que supone que el campo sonoro no se pueda considerar totalmente uniforme.

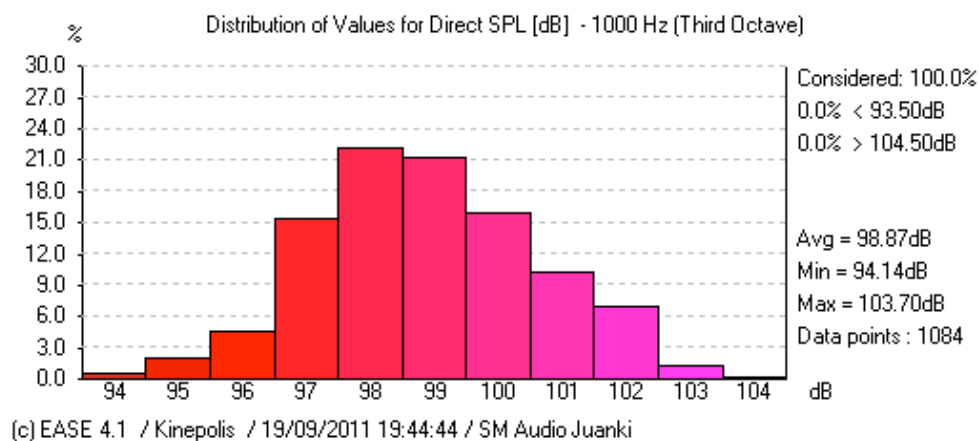


Fig. 7.54.: Distribución de los niveles del Direct SPL

Bien es cierto que en la mayoría de las butacas se tiene unos niveles entre 97 dB y 100 dB (ese margen de 3 dB que supone uniformidad), pero aparecen puntos en las zonas de butacas central-baja con niveles inferiores a estos. A su vez hay butacas en las zonas más altas que tienen valores superiores. Por tanto

se puede considerar que existe un problema de uniformidad, sin ser grave, debería mejorarse.

Este error puede ser debido a las aproximaciones tomadas en la orientación y potencia de radiación de los altavoces que ya comentamos en el apartado 7.4.3., por lo que se haría necesaria una medición en la sala real para valorar el recubrimiento.

También podemos deducir de este análisis que los niveles de energía directa están muy por encima de los valores de ruido (superan de manera muy holgada los 25 dB de margen) por lo que en este aspecto se puede decir que el nivel de presión sonora directo es el adecuado, si se seleccionan las potencias utilizadas en la simulación.

7.6.5.2. Total SPL

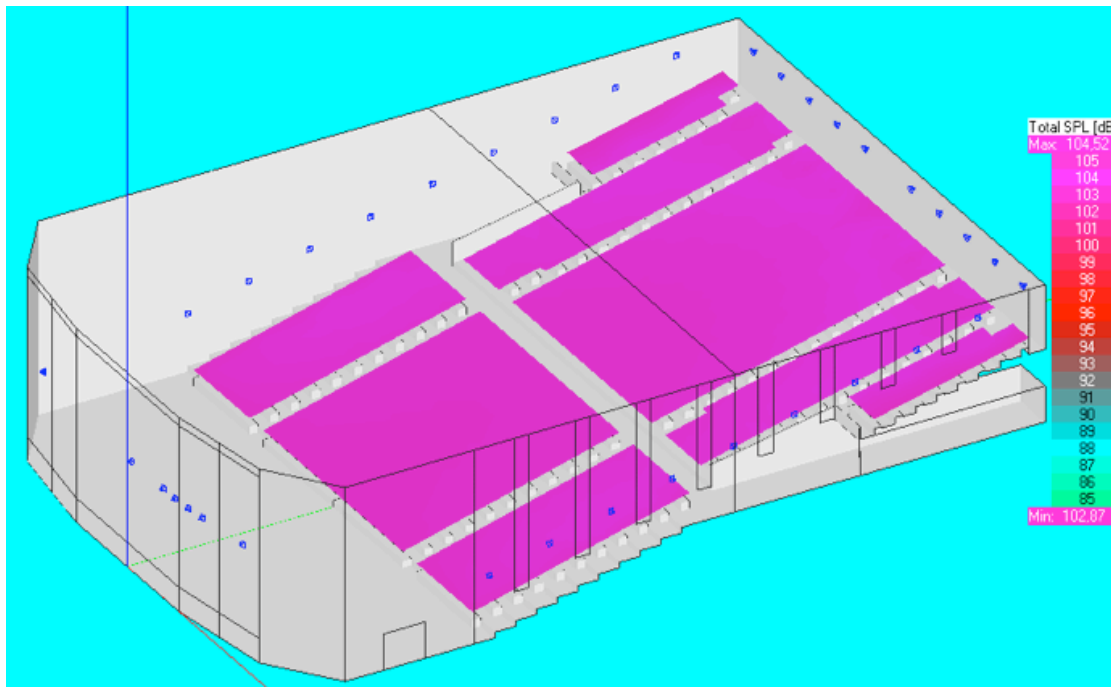


Fig. 7.55.: Simulación 3D de los niveles del Total SPL

El nivel energético total, en cambio, es muy uniforme para todo el área de audiencia para 1000 Hz.

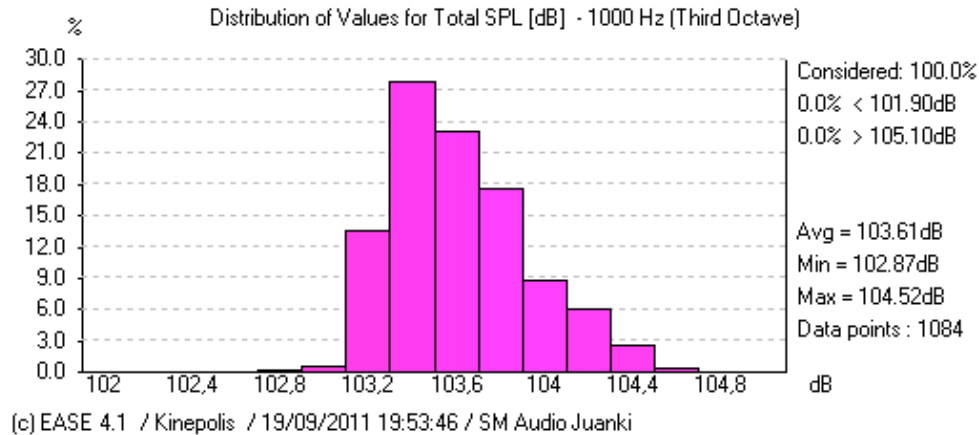


Fig. 7.56.: Distribución de los niveles del Total SPL

Prácticamente todos los valores de energía están dentro del margen de 1.2 dB. Estando todos dentro de los 3 dB.

La diferencia entre el nivel directo y el nivel total obtenidos, supondría que el nivel reverberante es más alto que el directo, lo que resulta extraño. Pese a que la sala sí resulta algo reverberante psicoacústicamente (apreciación subjetiva), esta diferencia tan grande no debería darse.

Con esto incidimos en que para calcular los valores del SPL, tanto directo como total, se haría necesitaría una medición real en la sala.

7.6.6. TIEMPOS DE LLEGADA (OVERLAP, FIRST ARRIVAL)

Debido a que el tipo de sonorización es mixto, es bueno que estudiemos los tiempos de llegada de los rayos sonoros, con motivo de aplicar retardos a los altavoces surround para que sigamos teniendo la imagen sonora en el mismo sitio que la visual. Para calcular el delay se utiliza la siguiente expresión:

$$\tau = \frac{r_1 - r_2}{c} \quad (\text{Ec. 7.3.})$$

Donde:

r_1 : distancia del oyente al altavoz del que se quiere hacer creer que viene el sonido.

r_2 : distancia al altavoz más cercano.

El área de audiencia a analizar es demasiado grande, un método que nos puede ayudar a ver la superposición de señales es el Overlap:

7.6.6.1. Overlap:

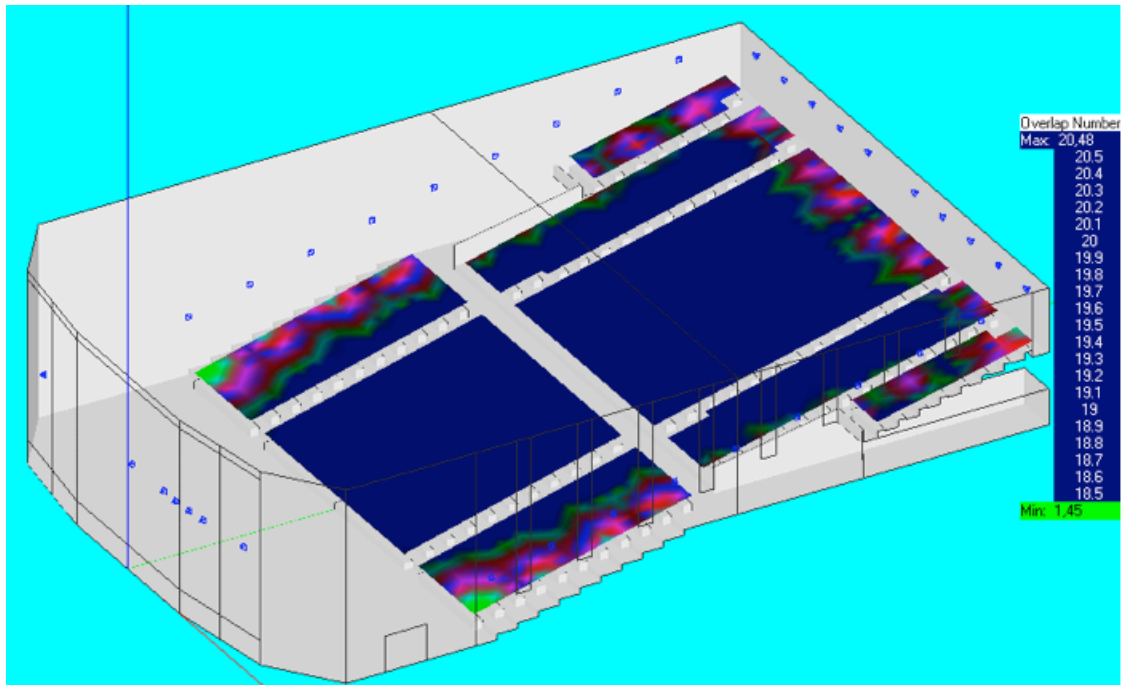


Fig. 7.57.: Simulación 3D de los niveles del overlap

Aunque vemos que esta medida no nos es de gran ayuda, puesto que la gran mayoría de la audiencia tiene una superposición de señales, más pronunciado en las zonas intermedias, debido a la simetría de los altavoces izquierdos y derechos. Por lo tanto deducimos que los puntos conflictivos son los marcados en azul más exteriores.

Una vez conocidos los puntos conflictivos, hallaremos sus distancias frente a los altavoces frontales y los más cercanos, de modo que saquemos el retardo óptimo de los altavoces surround (laterales).

De esta forma obtenemos que para los altavoces laterales son buenos unos retardos de 40 ms para los más cercanos a la pantalla y 135.6 ms para los más lejanos, con valores proporcionales para los altavoces intermedios. Y cercanos a 140 ms para los de la pared trasera.

Estos retardos se han tenido en cuenta a la hora de la simulación incluyendo cada uno de ellos en su respectivo altavoz.

Podemos contrastar estos resultados con los resultados del retardo con el que llega la señal sonora a la zona de audiencia dependiendo de los altavoces de emisión:

7.6.6.2. Time Arrival:

El cálculo del tiempo que tarda la señal a la zona de audiencia no depende de la frecuencia. Por lo tanto, de manera lógica, para estos parámetros no se incluirán nuevas gráficas en el anexo mencionado anteriormente.

- Llegada del sonido desde los altavoces frontales

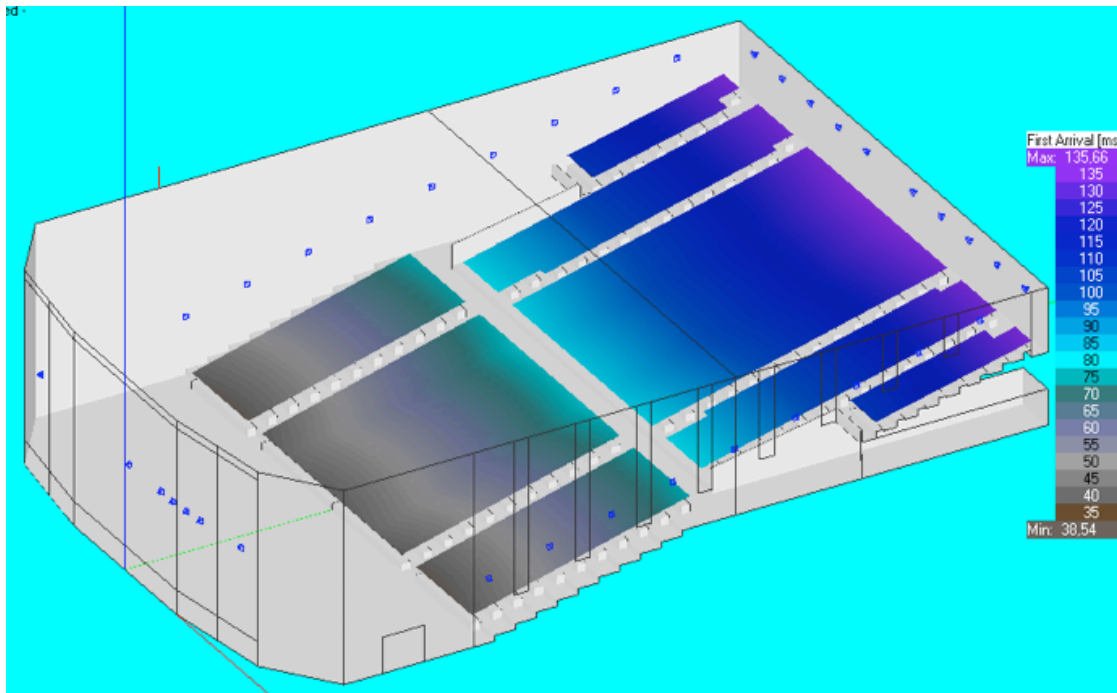


Fig. 7.58.: Simulación 3D de los niveles de llegada del sonido desde los altavoces frontales

Podemos apreciar que el sonido desde los altavoces frontales, situados en la pantalla, llega con un retardo de 38 ms para la zona más cercana de audiencia y con un retardo de 136 ms para la más alejada.

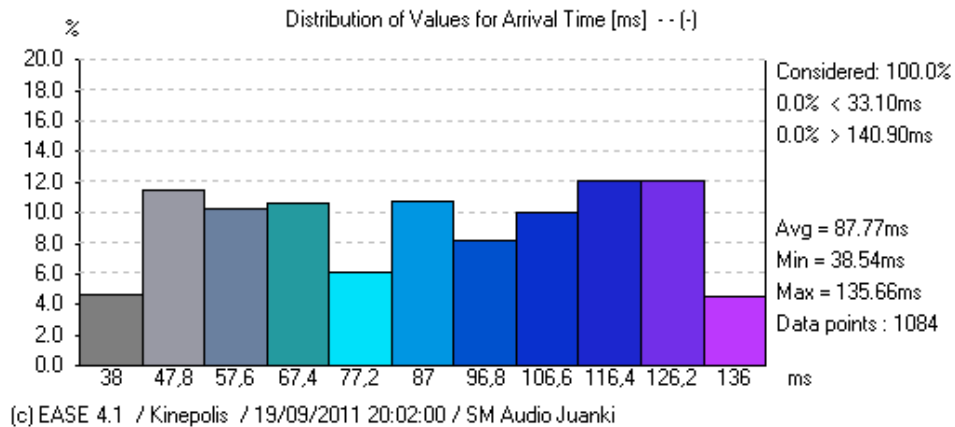
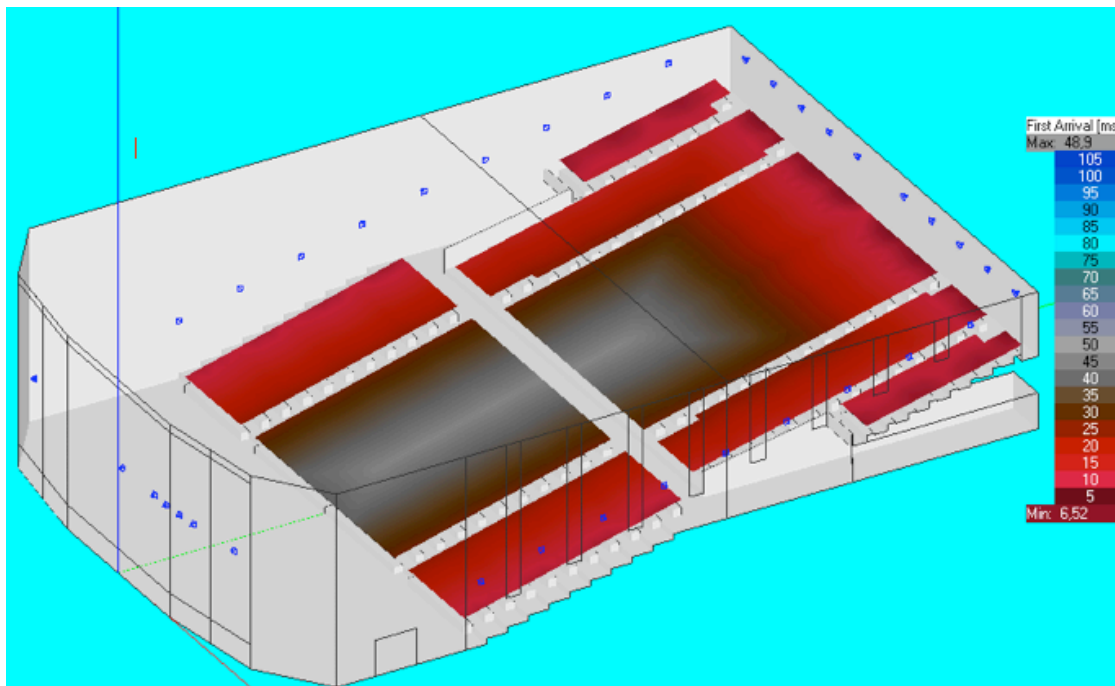


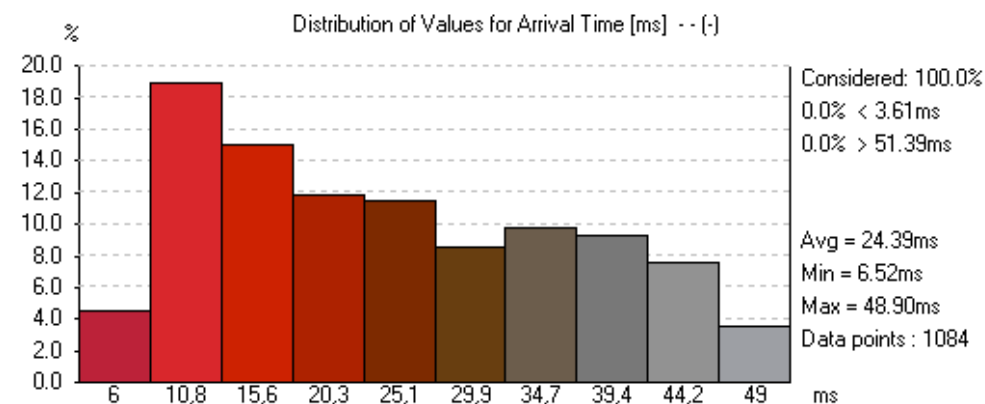
Fig. 7.59.: Distribución de los niveles de llegada del sonido desde los altavoces frontales

- Llegada del sonido desde los altavoces laterales y traseros:



(Fig. 7.61.: Simulación 3D de los niveles de llegada del sonido desde los altavoces surround)

Podemos apreciar que el sonido desde estos altavoces llega mucho antes a la zona de audiencia que desde los frontales, de 6 ms la zonas más cercanas a 49 ms las más alejadas.



(c) EASE 4.1 / Kinopolis / 10/06/2011 17:16:42 / SM Audio Juanki

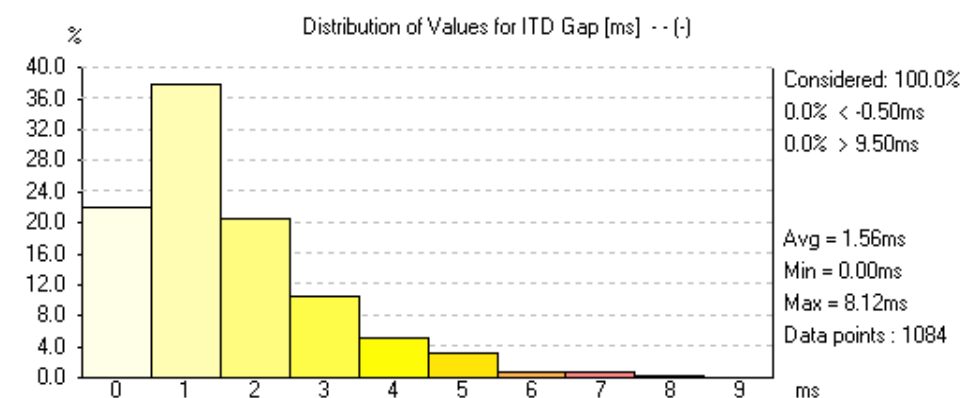
Fig. 7.60.: Distribución de los niveles de llegada del sonido desde los altavoces surround

Por lo que se justifica la aplicación, en la sala, de los retardos calculados a este grupo de altavoces para poder mantener la imagen sonora en la pantalla.

7.6.7. TIEMPO DE RETARDO (Initial Time Delay GAP)

Como ya hemos explicado en el apartado de parámetros acústicos, el ITD GAP, es el tiempo comprendido entre que llega el sonido directo y se recibe la primera reflexión.

Según Beranek, está relacionado con la 'intimidad acústica' (impresión de que el recinto es de menor tamaño a lo que en realidad es). Es recomendable un límite superior de 20 ms, para una posición central frente al escenario.



(c) EASE 4.1 / Kinopolis / 19/09/2011 19:30:29 / SM Audio Juanki

Fig. 7.61.: Distribución de los niveles del ITD Gap

Podemos observar que los tiempos son muy pequeños, todos por debajo de 8.12 ms, respetando el límite superior de 20 ms recomendable y el límite superior de 30 ms obligatorio establecido por Hass (a partir de ese tiempo, los rayos sonoros se convierten en ecos molestos).

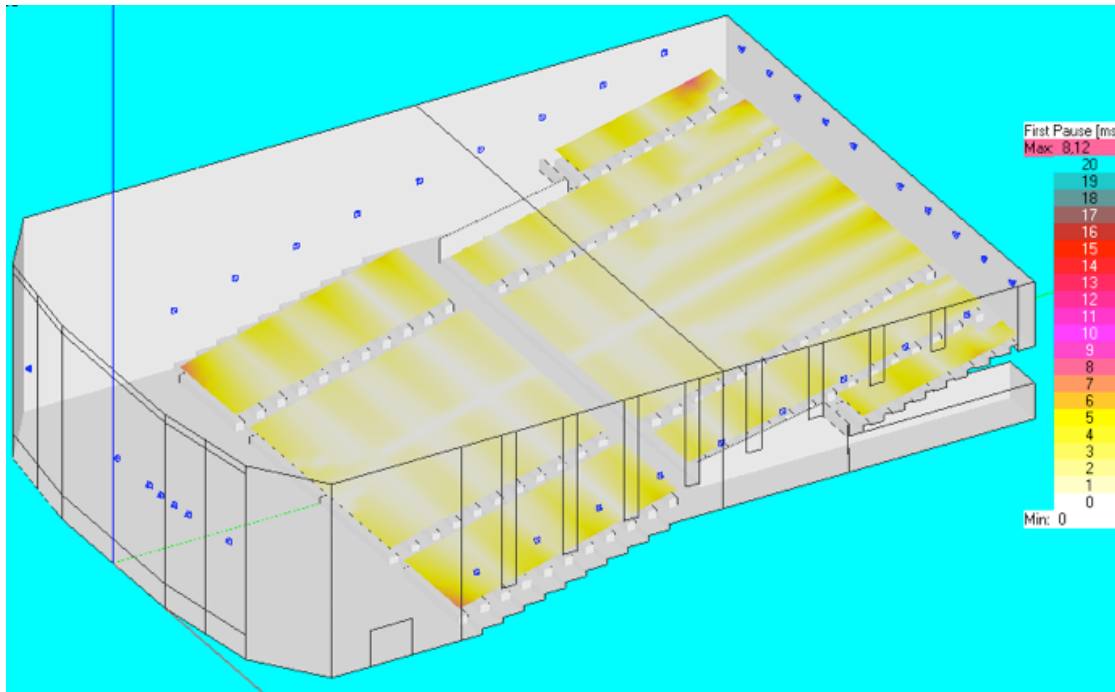


Fig. 7.62.: Simulación 3D de los niveles del ITD Gap

Para la mayoría de la audiencia (92%) se obtienen valores entre 0 y 3 ms de ITD Gap. Los puntos más conflictivos son las esquinas exteriores inferiores, para los que se dan valores de 8.12 ms, estando dentro del rango recomendable, obteniendo una calidad muy buena en este aspecto.

El ITD GAP está relacionado también con la textura, para que haya una buena textura tendrá que tener valores pequeños. Por lo tanto disfrutamos de una buena textura en esta sala.

8. PRESUPUESTO

MATERIAL

Ordenador personal	800 €
Material de oficina	40 €
Conexión a Internet ADSL	360 €
Licencia de software EASE	1760 €

HONORARIOS

12 meses x 20 días/mes x 6 horas/día x 15 €/hora	21600 €
--------------------------------------------------	---------

Subtotal del presupuesto:	24560 €
I.V.A (16 %)	3929.6 €

TOTAL PRESUPUESTO	28489.6 €
--------------------------	------------------

9. CONCLUSIONES

Una sala de cine tiene unas características propias que modelan su comportamiento y funcionamiento acústico. Así como la proyección de una película exige unos requisitos para el mayor disfrute de la misma. En este proyecto nos hemos adentrado en el mundo de la acústica arquitectónica desde una visión puramente analítica.

Para alcanzar los objetivos previstos hemos incluido una base teórica extensa que se ajusta a lo que encontramos en una sala de cine, expuesta de forma sencilla para dotar al lector de un punto de vista global sobre la acústica. Así, tanto expertos como personas con escasas nociones han podido encarar la lectura del estudio de simulación con plenas garantías de entender el texto.

Conceptualmente, el proyecto resulta especialmente interesante debido a que se explican elementos característicos de una sala cinematográfica como son el sistema de sonido (sistema surround) o el certificado THX, y se lleva a cabo de forma detallada pero breve. Además, se describe la configuración de altavoces y especificaciones de los mismos, de modo que se obtiene la información necesaria acerca del refuerzo sonoro.

Es también interesante la comparación que se realiza con otro tipo de salas como son las de conferencias o las de conciertos.

Dentro del estudio específico de la sala 25 de los cines Kinépolis, las reticencias de esta empresa privada a la hora de ofrecer información (los coeficientes de absorción de los materiales de la sala y las potencias de radiación y la orientación de los altavoces son supuestos), han provocado que los resultados de cada parámetro acústico analizado hayan sido finalmente una aproximación. No obstante, cuando se realiza una simulación previa a la construcción de cualquier tipo de sala para conocer su futuro comportamiento acústico tampoco se maneja la información exacta en algunos detalles tales como los coeficientes de absorción de los materiales, procediéndose posteriormente a realizar una serie de medidas para validar el modelo simulado.

Por otra parte, Kinépolis, al tratarse de una empresa que compite por ofrecer las mejores salas a nivel mundial, no nos ha permitido realizar medidas dentro de la sala para ajustar el modelo. De esta forma, los resultados deben tomarse de forma orientativa, teniendo mayor importancia el proceso de estudio y las conclusiones sacadas del análisis.

Además la sala 25 de los cines Kinépolis es la más grande de Europa, por lo que su estudio nos ofrece una visión más amplia de las necesidades del recinto para alcanzar unos requisitos de calidad estipulados puesto que las dificultades que se presentan son mayores.

Hemos analizado una de esas dificultades que se presentaron una vez construida la sala (ecos en las butacas centrales) y la solución que se adopta para resolver el problema, lo que nos aporta una visión más real y experimentada.

Finalmente hemos analizado el comportamiento acústico de la sala a partir de la obtención de los parámetros acústicos mediante la simulación del recinto. Esta parte está explicada de forma especialmente sencilla y apoyada con gráficas y valores recomendados para la sala para que el estudio de simulación pueda servir como base de futuros proyectos de este tipo.

10. TRABAJO FUTURO

Este proyecto puede ser completado en dos aspectos principalmente:

- Como ya hemos comentado anteriormente, no se han podido tomar medidas en la sala debido a la negativa por parte de Kinépolis. Se propone, por tanto, como proyecto futuro, la medición en la sala 25 para validar el modelo y ajustar las aproximaciones de los resultados a los valores reales.
- Por otra parte, también se mencionó que la sala 25 de los cines Kinépolis, además de utilizarse para la proyección de películas, se utilizaba como sala de conferencias y como sala de conciertos en acústico. Por tanto, se podría simular el recinto acorde a estas finalidades y en base a las características exigidas para alcanzar una acústica óptima en ambos casos.

Resulta más interesante la primera propuesta, debido a que mejora el proyecto centrándose en el estudio de una sala cinematográfica, mientras que la segunda simplemente lo completa respecto a la actividad real de esta sala específica. Además, la sala 25 se utiliza en su mayoría para la proyección de películas, por lo que los otros usos quedan en segundo plano.

11. BIBLIOGRAFÍA:

- Manuel Recuero. 'Acústica Arquitectónica'. Madrid 2001.
- Manuel Recuero. 'Ingeniería acústica'. Madrid 1999.
- José Luis Sánchez Bote. 'Transductores Electroacústicos'. Madrid 2006.
- José Luis Sánchez Bote. 'Altavoces'. Madrid 2006.
- José Luis Sánchez Bote. 'Micrófonos'. Madrid 2006.
- César Díaz Sanchidrián. 'Acústica en la edificación y el urbanismo'. Madrid 2003.
- Apuntes 'Audio en Telecomunicaciones'. Universidad Carlos III. Madrid 2009.
- Apuntes 'Fundamentos de Ingeniería Acústica'. Universidad Carlos III. Madrid 2008.
- Masataka Nakahara. 'Multichannel Monitoring Tutorial Booklet'. Yamaha/Sona Corporation 2005.
- Dolores García Escribano. 'Estudio acústico de una sala equivalente'. Madrid 2007.

Páginas web:

- Historia de la acústica:

- http://www.electricalfacts.com/Neca/Science_sp/sound/history_sp.shtml
- <http://www.monografias.com/trabajos32/ecuaciones-fisica/ecuaciones-fisica.shtml#intro>
- http://usuarios.multimania.es/pacolorente/TeatrosRomanos/06Acustica_Teatro.htm
- <http://es.wikipedia.org/wiki/Acústica#Historia>
- <http://www.arqhys.com/construccion/acustica-arquitectonica.html>
- <http://www.uhu.es/cine.educacion/cineyeducacion/cinesonoro.htm>
- <http://www.infosonido.es/cine/historia.htm>

- Teorías acústicas:

- <http://www.eumus.edu.uy/docentes/maggiolo/acuapu/umb.html>
- <http://rabfis15.uco.es/lvct/tutorial/1/paginas%20proyecto%20def/%289%29%20Control%20por%20absorcion/absorcion%20acustica.htm>
- <http://fisica.laguia2000.com/acustica/acustica-de-recintos-ii>
- <http://www.elruido.com/divulgacion/curso/sonoridad.htm>
- http://www.sonidoyaudio.com/sya/vp-tid:2-pid:19-tipos_de_microfonos.html
- <http://www.productormusical.es/2010/05/tipos-de-microfonos/>

- Altavoces KCS:

- <http://www.kcsspeakers.com/>

- Manual EASE:

- <http://www.renkus-heinz.com/ease/index.html>

- Kinépolis:

- <http://www.kinepolis.com/es/>